

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

**FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS**  
**Departamento de Física de la Tierra Astronomía y Astrofísica I**  
**(Geofísica y Meteorología)**



**EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN LA  
CIUDAD DE MÁLAGA.**

**MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR**  
**PRESENTADA POR**

**Tatiana Goded Millán**

Bajo la dirección de la doctora

Elisa Buform Peiró

**Madrid, 2010**

**ISBN: 978-84-693-7848-9**

**© Tatiana Goded Millán, 2010**

**Programa de doctorado en Física de la Tierra:  
Geofísica y Meteorología**

**Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I  
(Geofísica y Meteorología)**

**Facultad de Ciencias Físicas**

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**



# **EVALUACIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN LA CIUDAD DE MÁLAGA**

**Memoria presentada para optar al Grado de Doctor en Física por**

**Tatiana Goded Millán**

**Directora: Dra. Elisa Bufoñ Peiró**

**Madrid, marzo de 2010**



*“I usually point out that most loss of life and property  
has been due to the collapse of antiquated and unsafe structures,  
mostly of brick and other masonry”  
(Charles Francis Richter)*

*“It takes an earthquake to remind us  
that we walk on the crust of an unfinished earth”  
(Charles Kuralt)*





# *Agradecimientos*

Hay muchas personas a las que tengo que dar las gracias, gente que, a lo largo de los años en que he cursado estudios de doctorado, me han ofrecido su apoyo, su ayuda y sus valiosos consejos, o simplemente por saber que estaban ahí en todo momento.

En primer lugar, deseo expresarle mi más profundo agradecimiento a la Dra. Elisa Buform, mi directora, por ofrecerme la oportunidad, hace ya seis años, de participar en un proyecto tan interesante, y de tanta responsabilidad, como fue el proyecto *ERSE*, y por confiar en que yo, por entonces alumna de quinto curso, sería capaz de aportar algo a un estudio que hoy culmina con este trabajo. Gracias también por tu accesibilidad, cercanía y valiosos consejos, tanto en lo profesional como en lo personal, a lo largo de estos años, que me han ayudado a comprender un poco mejor el complejo mundo de la sismología y el riesgo sísmico.

Al Dr. Antoni Roca, del Institut Geològic de Catalunya (IGC), en Barcelona, y a los doctores Xavier Goula, Teresa Susagna, Janira Irizarry (área de Sismología), Sara Figueras y Albert Macau (Unidad de Técnicas Geofísicas), miembros del proyecto *ERSE*, sin cuya ayuda y consejos en las numerosas estancias en Barcelona, esta tesis no sería hoy una realidad. Por su siempre calurosa acogida, por dedicarme tanto tiempo y por ofrecerme tanta ayuda, les estoy profundamente agradecida. También a los que fueron mis compañeros durante mis estancias allí, en especial a Tanit Frontera y Mar Tapia.

Quiero dedicarles un agradecimiento especial a las dos personas del IGC sin cuya ayuda esta tesis no habría sido posible: los doctores Albert Macau y Janira Irizarry. A Albert, con el que he compartido varias campañas de ruido sísmico, y que me aportó la mayor parte de mis conocimientos sobre efecto de sitio, por enseñarme a manejar el programa *ProShake*, por la abundante bibliografía que me ha aportado, por su paciencia y sus valiosos consejos, por estar siempre disponible cuando me surgían dudas “a distancia”, y por su amistad. A Janira, que me introdujo en mis primeros conceptos de vulnerabilidad sísmica y me enseñó a manejar la metodología del índice de vulnerabilidad, por sus valiosos consejos, su meticulosidad y atención al detalle, y por la elaboración de los primeros (y algunos de los últimos), mapas en *Sistema de*

*Información Geográfica* preparados para este trabajo, con todo el trabajo y el esfuerzo que supuso. También por su compañía en los viajes, y por su contagiosa alegría de vivir.

A Xavi, Laura y Gabriel, becarios de colaboración del Institut Geològic de Catalunya durante mis estancias en Barcelona, por la elaboración de todos los mapas en *Sistema de Información Geográfica* de este trabajo. Por su paciencia conmigo y por dedicarme su tiempo de trabajo casi exclusivamente durante mis estancias, a esa “chica de Madrid” que iba con tantos mapas por hacer. Mi más profundo agradecimiento a los tres.

A los miembros de la sección de Sismología del Real Instituto y Observatorio de la Armada de San Fernando, Cádiz (ROA), en especial a los doctores José Martín Dávila, Antonio Pazos y José Prian, miembros también del proyecto *ERSE*, por su ayuda, su paciencia a la hora de poner al día los datos de la red sísmica *Western Mediterranean*, sus consejos y sus palabras de ánimo.

Al Dr. Luis Alberto Rivera, Catedrático de Universidad del Institut de Physique du Globe de Estrasburgo, perteneciente a la Universidad Louis Pasteur de Estrasburgo (Francia), responsable de mi estancia de tres meses en dicha institución, durante la cual se desarrolló el capítulo de las funciones de Green teóricas. Gracias por su ayuda, su apoyo y su calidez.

A la empresa LIDYCCE (Laboratorio del Instituto de Investigación, Desarrollo y Control de Calidad en la Edificación, S.L.), colaboradora del proyecto *ERSE*, por facilitarme la base de datos con la información geotécnica de los diversos sondeos realizados por dicha empresa en la ciudad de Málaga. En especial, quiero expresar mi agradecimiento a Daniel Clavero por aclararme algunas dudas de la geología de la ciudad de Málaga, así como por su disponibilidad, y a José Luis Clavero, por la información proporcionada acerca del paleocauce y la falla que parecen existir en la zona de la C/ Bolsa cercana a la Catedral malagueña.

A Ricardo García, arquitecto técnico de Málaga, por su inestimable ayuda revisando y corrigiendo los modificadores del índice de vulnerabilidad de los monumentos del centro de Málaga, por su amabilidad y ayuda desinteresada, y por su gran interés en mi trabajo. También por proporcionarme valiosa bibliografía sobre los monumentos de la zona centro de Málaga. Asimismo, quiero agradecer a los arquitectos

técnicos Pablo Pastor Vega y Luis Alfonso Martín Delgado, consultados por el Sr. Ricardo García, por toda la valiosa información que me proporcionaron de las iglesias malagueñas y de la Alcazaba, respectivamente. Toda esta información proporcionada fue cuidadosamente revisada y analizada, contrastándose con la que yo poseía previamente. Cualquier error cometido en los modificadores del índice de vulnerabilidad es exclusivamente mío.

A todos los miembros del Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I (Geofísica y Meteorología), de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid. En especial, quiero dar las gracias a los tres profesores que han sido directores del departamento durante mi estancia en él: los doctores Agustín Udías, Elvira Zurita y Miguel Herraiz, siempre preocupados por el buen funcionamiento del departamento y que siempre tuvieron una palabra amable de ánimo y apoyo para mí.

A los doctores Agustín Udías y Dolores Muñoz, miembros del departamento de Geofísica y Meteorología de la UCM, por todo lo que me han aportado en conocimientos de Sismología, así como por sus valiosos consejos y su apoyo.

A Lucía y a Salva, “el alma del departamento”, por su gran labor, su paciencia cuando acudimos a ellos preocupados, su buen hacer, su disponibilidad y su cercanía. Sin ellos, estos años no habrían sido lo mismo.

A mis compañeros del laboratorio de Geofísica II y a aquéllos que, aunque no formaban parte de él, siempre han estado cerca: Carmen, Almudena, Juan Luis, Daniel, Simone, Paco, Jacques, Beatriz, Javier, Arancha, Ana, Javi, Eva, María, Esther, Diana, Yasmina y Társilo. Por su ayuda desinteresada en cualquier momento, por enseñarme (y recordarme) tantas cosas, por las grandes conversaciones (¡y discusiones!) en la cafetería de la facultad, que eliminaban las tensiones del día y siempre hicieron la estancia más agradable, por su apoyo, por las risas del laboratorio (que oía todo el mundo...), y por estar siempre ahí. ¡Gracias, chicos!

En especial debo destacar a dos personas que han sido mis compañeras más cercanas y con las que he compartido tanto durante este tiempo...Carmen y Almudena. Quiero dejar constancia de los años que compartimos las tres juntas, trabajando codo con codo, resolviendo fallos en las estaciones, viajando juntas a congresos o en busca de documentación histórica de terremotos. Ha sido un placer compartir ese tiempo con vosotras, que hizo que todo fuera tan sencillo... A Carmen, a la que considero mi *tutora en la sombra*, pues me enseñó desde mis primeros comandos en lenguaje *UNIX* hasta a “leer cintas”. Por su accesibilidad, su profesionalidad y su paciencia, y por estar ahí siempre que la he necesitado. Gracias, Carmen, de todo corazón. A Almudena, que ha estado ahí desde el principio, desde el primer día, hace ya doce años, en que llegué a la facultad y no sabía encontrar la clase. Ahí apareció ella y me guió, y así ha actuado en todos estos años: compañera de clase, compañera de prácticas y amiga, guía, consejera y apoyo constante. Juntas decidimos hacer Geofísica, juntas hemos compartido tanto...viajes de placer y trabajo, risas y lágrimas...Y juntas acabamos en el departamento, trabajando codo con codo. Incluso había quien nos confundía...A ti, Almu, por estar siempre ahí y por tu profunda amistad, gracias.

A mis compañeros de doctorado del Institut de Physique du Globe de Estrasburgo, en especial a Caroline, Mélanie, Amélie, Valérie y Elise, por su calidez y su amistad, y por esforzarse en hablarme en inglés durante mi estancia.

A título personal, debo agradecer también a algunas personas que, si bien no podían ayudarme a nivel profesional, siempre han estado allí para apoyarme y animarme a seguir. Sin ellos esta tesis no habría sido posible.

En primer lugar quiero dar las gracias a mi grupo de amigos de la facultad, con los que empecé con ilusión la carrera de Física. Me siento muy honrada de haber formado parte de él y de haber compartido tantas cosas...Cada uno ha seguido un camino distinto, unos están haciendo el doctorado como yo, otros han escogido otras opciones, pero la amistad forjada es muy fuerte y sé que estará ahí siempre. Ahora que se termina mi larga etapa en la facultad, no quiero dejar de recordarlos a ellos, en especial a los más cercanos: Almudena, Ana, Joaquín, Cristina, Juan, David, Rosa, M<sup>a</sup> Carmen y Vanessa. Gracias a todos por vuestra amistad. También quiero añadir a dos

personas que, aunque fuera de mi círculo más cercano de amigos, han significado mucho para mí en estos años, por su amistad, por las grandes conversaciones mantenidas y por algunos momentos inolvidables: Manuel y Margarita.

A Jose, Adrián y Miguel, por su amistad y fuente de inspiración, y por estar siempre ahí. Por haberme aportado tanto en los últimos años, por todo lo que compartimos y por lo que aún queda por compartir, por los grandes momentos juntos y por ayudarme a ser mejor persona. ¡Os quiero, chicos! También a Rudi y Claudio, por su apoyo y su cariño, y por estar siempre pendientes de cómo iba mi trabajo.

Y “*last but not least*”, a mi familia, que siempre está ahí cuando la necesito. A mi madre, apoyo y aliento, por enseñarme a valirme en el mundo y a apreciar las cosas buenas de la vida, y por apoyarme en todo momento, decida lo que decida. Y a mis dos hermanas, que siempre me han apoyado y me han animado a seguir en el mundo de la investigación.

Este trabajo ha sido posible gracias a una beca de Formación de Profesorado Universitario concedida por el Ministerio de Educación y Ciencia (actualmente Ministerio de Ciencia e Innovación) (referencia AP2005-0181), entre 2006 y 2010, así como por una beca a cargo del proyecto *ERSE* (“Escenarios Realistas de Riesgo Sísmico en España”, REN2003-5178-C03-01), financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, de 2004 a 2006. Este trabajo también ha sido parcialmente financiado por el proyecto *RISTE* (“Riesgo de Terremotos y Tsunamis en España”, CGL2006-10311-C03-01/BTE), del Ministerio de Educación y Ciencia, del que he formado parte en 2008-2009.

*Madrid, a 28 de octubre de 2009*









# ÍNDICE

Página

Lista de tablas .....	v
Lista de figuras .....	vii
<i>Summary</i> .....	<i>1</i>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>5</b>
<b>2. Sismicidad de la región de Málaga.....</b>	<b>13</b>
<b>3. Metodología.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1. Efecto de sitio .....</b>	<b>21</b>
3.1.1. Definiciones de parámetros generales utilizados en efecto de sitio .....	21
3.1.2. Conceptos básicos sobre la peligrosidad sísmica a escala regional.....	23
3.1.3. Peligrosidad sísmica a escala local.....	25
3.1.3.1. Método del cociente espectral H/V .....	29
3.1.3.2. Simulación numérica 1D. Método lineal equivalente .....	35
3.1.4. Generación de sismogramas teóricos .....	46
3.1.4.1. Método de las funciones de Green empíricas .....	47
3.1.4.2. Método de la discretización del número de onda.....	49
<b>3.2. Vulnerabilidad: método de los índices de vulnerabilidad .....</b>	<b>53</b>
3.2.1. Definiciones de parámetros generales utilizados en vulnerabilidad.....	53
3.2.2. Conceptos básicos sobre vulnerabilidad sísmica.....	55
3.2.2.1. Métodos de evaluación de la vulnerabilidad.....	55
3.2.2.2. Estudios de vulnerabilidad en Europa.....	57
3.2.2.3. La vulnerabilidad en los centros urbanos.....	59
3.2.2.4. La vulnerabilidad de edificios históricos y monumentos.....	60
3.2.3. El método de los índices de vulnerabilidad. Aplicación a monumentos y edificios históricos.....	63
<b>3.3. Escenarios sísmicos.....</b>	<b>69</b>
3.3.1. Escenario determinista .....	69
3.3.2. Escenario probabilista .....	70

<b>4. Efecto de sitio: Microzonación .....</b>	<b>73</b>
4.1. Introducción.....	73
4.2. Método del cociente espectral H/V .....	77
4.2.1. Campaña de medidas de ruido sísmico en Málaga.....	77
4.2.2. Resultados.....	80
4.2.3. Conclusiones.....	81
4.3. Simulación numérica 1D. Método lineal equivalente .....	83
4.3.1. Definición de las columnas de suelo .....	83
4.3.2. Selección del acelerograma de entrada en roca .....	85
4.3.3. Resultados.....	86
4.3.4. Aplicación al terremoto de 1680 .....	107
4.3.5. Efectos locales del suelo utilizando registros de aceleración teóricos ..	108
4.3.5.1. Método de las funciones de Green empíricas .....	108
4.3.5.2. Método de la discretización del número de onda.....	113
4.3.6. Comparación de los resultados para distintos acelerogramas .....	119
4.4. Comparación de los resultados obtenidos con la técnica de Nakamura y el método 1D lineal equivalente .....	129
<b>5. Vulnerabilidad en la ciudad de Málaga.....</b>	<b>133</b>
5.1. Introducción.....	133
5.2. Monumentos estudiados .....	134
5.3. Resultados .....	143
5.3.1. Aplicación de la microzonación de Málaga .....	143
5.3.2. Índices de vulnerabilidad de los monumentos de Málaga.....	145
5.3.3. Curvas de vulnerabilidad por tipologías.....	149
5.3.4. Curvas de vulnerabilidad individuales .....	154
5.3.5. Grados de daño de los monumentos de Málaga .....	166
5.3.6. Probabilidades de daño de los monumentos de Málaga.....	171
5.4. Conclusiones .....	174

<b>6. Escenarios sísmicos en la ciudad de Málaga .....</b>	<b>177</b>
6.1. Introducción.....	177
6.2. Clasificación de monumentos de la zona centro de Málaga .....	178
6.3. Índices de vulnerabilidad de los monumentos de Málaga.....	183
6.4. Escenario determinista: terremoto de 1680 .....	186
6.4.1. Grados de daño de los monumentos de Málaga .....	187
6.4.2. Probabilidades de daño de los monumentos de Málaga.....	190
6.4.3. Conclusiones.....	197
6.5. Escenario probabilista: NCSE-02.....	198
6.5.1. Grados de daño de los monumentos de Málaga .....	199
6.5.2. Probabilidades de daño de los monumentos de Málaga.....	202
6.5.3. Conclusiones.....	206
6.6. Comparación entre ambos escenarios sísmicos.....	206
<b>7. Conclusiones.....</b>	<b>211</b>
<i>Conclusions.....</i>	<i>217</i>
<b>8. Referencias .....</b>	<b>223</b>

**ANEXOS .....245**

Anexo I. Geología de la ciudad de Málaga .....	245
Anexo II. Cocientes espectrales H/V.....	249
Anexo III. Método lineal equivalente.....	257
Caracterización de las columnas de suelo .....	257
Funciones de transferencia .....	266
Anexo IV. Método de las funciones de Green empíricas .....	271
Anexo V. Método de la discretización del número de onda.....	281
Anexo VI. Correctores del índice de vulnerabilidad para cada tipología.....	289
Anexo VII. Índices de vulnerabilidad para los monumentos de Málaga.....	295
Anexo VIII. Tablas de probabilidades de daño .....	303
Anexo IX. Histogramas de probabilidades de daño .....	305
Anexo X. Escenarios sísmicos: índices de vulnerabilidad .....	309
Anexo XI. Escenario determinista: terremoto de 1680 .....	325
Grados de daño .....	325
Tablas de probabilidades de daño.....	327
Histogramas de probabilidades de daño .....	331
Anexo XII. Escenario probabilista: NCSE-02.....	341
Grados de daño .....	341
Tablas de probabilidades de daño.....	343
Histogramas de probabilidades de daño .....	347

## **Lista de tablas**

Se incluyen todas las tablas de este trabajo a excepción de las contenidas en los anexos.

### Página

Tabla 2.1. Sismicidad histórica a distancias epicentrales inferiores a 90km de la ciudad de Málaga (Banco de Datos Sísmicos del I.G.N.).....	16
Tabla 3.1. Índice de vulnerabilidad y parámetro $\phi$ para cada tipología de monumento.....	65
Tabla 4.1. Microzonación de Málaga según el coeficiente C (norma NCSE-02) .....	75
Tabla 4.2. Frecuencias fundamentales del suelo (Nakamura).....	80
Tabla 4.3. Caracterización de las columnas de suelo en el centro de Málaga. Columna 0a (roca) .....	85
Tabla 4.4. Frecuencias fundamentales ( $v_{fund}$ ), amplificaciones del suelo y amplificaciones en términos de intensidad ( $\Delta I$ ) de cada una de las columnas estudiadas .....	92
Tabla 4.5. Frecuencias fundamentales, amplificaciones del suelo y amplificaciones en términos de intensidad ( $\Delta I$ ), de las columnas modelo que caracterizan las subzonas de la nueva microzonación del centro de Málaga .....	93
Tabla 4.6. Parámetros característicos de cada una de las subzonas .....	103
Tabla 4.7. Nueva microzonación del centro de Málaga. Aplicación al terremoto de Málaga de 1680.....	108
Tabla 4.8. Microzonación de Málaga en 2 tipos de suelos. Aplicación al terremoto de Málaga de 1680.....	108
Tabla 4.9. Parámetros focales del sismo de noviembre de 2002 (Banco de Datos del I.G.N.).	109
Tabla 4.10. Características de las STF .....	109
Tabla 4.11. Parámetros focales del sismo de agosto de 2002 (Banco de Datos del I.G.N.).....	113
Tabla 4.12. Modelo MAL1 (Península Ibérica) .....	114
Tabla 4.13. Modelo MAL2 (mar de Alborán).....	114
Tabla 4.14. Modelo MAL3 (global CRUST2).....	115
Tabla 4.15. Modelo MAL4 (Béticas) .....	115
Tabla 4.16. Orientaciones de los planos de falla y profundidades de los dos sismos utilizados para simular el terremoto de Málaga de 1680 (Fresno, 2004).....	118
Tabla 4.17. Duraciones de la STF para el terremoto de Málaga de 09/10/1680 .....	118
Tabla 4.18. Características de los diferentes acelerogramas de entrada en roca utilizados en <i>ProShake</i> .....	124
Tabla 4.19. Frecuencias fundamentales, amplificaciones del suelo y amplificaciones en intensidad para los registros IM1 e IM2 y las columnas modelo de cada subzona.....	125
Tabla 4.20. Frecuencias fundamentales del método del cociente espectral H/V y el método 1D lineal equivalente (en negrita se marcan las columnas modelo de cada tipo de suelo).....	130
Tabla 4.21. Frecuencias fundamentales: método del cociente espectral H/V y método 1D lineal equivalente: columnas modelo de cada una de las zonas definidas .....	130

Tabla 5.1a. Edificios dañados en 1680. Grados de daño 4 y 5 (Goded, 2006).....	137
Tabla 5.1b. Edificios dañados en 1680. Grados de daño 2 y 3 (Goded, 2006) .....	138
Tabla 5.2. Estado actual de los edificios dañados en 1680 .....	140
Tabla 5.3. Tipologías de monumentos .....	141
Tabla 5.4. Monumentos de Málaga dañados en 1680 y que existen en la actualidad .....	141
Tabla 5.5. Monumentos de Málaga dañados en 1680. Aplicación de la microzonación de Málaga.....	143
Tabla 5.6. Grados de daño promedio para cada monumento .....	168
Tabla 6.1. Monumentos del centro de Málaga que van a ser analizados .....	179
Tabla 6.2. Monumentos con mayores índices de vulnerabilidad medios.....	184
Tabla 6.3. Intensidades para cada tipo de suelo (escenario 1680).....	187
Tabla 6.4. Monumentos de Málaga. Aplicación de la microzonación de Málaga (escenario 1680) .....	188
Tabla 6.5. Intensidades para cada tipo de suelo (escenario NCSE-02) .....	198
Tabla 6.6. Monumentos de Málaga. Aplicación de la microzonación de Málaga (escenario NCSE-02).....	200

## **Lista de figuras**

Se incluyen todas las figuras de este trabajo a excepción de las contenidas en los anexos.

	Página
Figura 2.1. Sismicidad de la Península Ibérica ( $M \geq 3.5$ , 1980-2008; Banco de Datos Sísmicos del Instituto Geográfico Nacional). En círculos rojos los sismos superficiales ( $h \leq 40$ km), en círculos verdes los de profundidad intermedia ( $40\text{km} < h \leq 150\text{km}$ ), y en círculos azules los profundos ( $600\text{km} \leq h \leq 700\text{km}$ ) .....	14
Figura 2.2. Sismicidad histórica de la Península Ibérica ( $I_{\max} \geq \text{VIII}$ , MSK; Banco de Datos Sísmicos del Instituto Geográfico Nacional).....	15
Figura 2.3. Sismicidad instrumental (1980-2008, $M \geq 3.5$ ; círculos), e histórica ( $I_{\max} \geq \text{VII}$ , MSK; triángulos) en la zona de Málaga (Banco de Datos Sísmicos del Instituto Geográfico Nacional), correspondiente al recuadro marcado en las figuras 2.1 y 2.2. Los terremotos con mayor intensidad ocurridos en la zona se muestran con sus fechas. ....	16
Figura 2.4. Mapas de intensidades para los sismos de 1494 (a) y 1680 (b). La zona mostrada corresponde al recuadro marcado en las figuras 2.1 y 2.2 (Goded et al., 2008a). Las estrellas corresponden a los epicentros propuestos por distintos autores: Martínez Solares y Mezcua (2002) (en rojo); Muñoz y Udías (1988) (en verde); catálogo de tsunamis del I.G.N. (en azul); Goded <i>et al.</i> (2008) (en violeta). “S?” indica que el sismo probablemente se sintió en esa población; “?” denota a las poblaciones con información ambigua.....	19
Figura 3.1. Espectros de respuesta en función del tipo de suelo, la distancia al epicentro y el tipo de edificios (Benito y Cabañas, 1999) .....	27
Figura 3.2. Cociente espectral H/V obtenido a partir de la técnica de Nakamura para suelo blando.....	32
Figura 3.3. Esquema de la propagación vertical de las ondas de cizalla a través de un medio unidimensional semi-infinito estratificado en capas planas (modificado a partir de Coral, 2002) .....	37
Figura 3.4. Esquema del perfil utilizado en <i>ProShake</i> .....	44
Figura 3.5. Influencia de la variación del índice de vulnerabilidad en el grado de daño promedio .....	66
Figura 3.6. Influencia de la variación del parámetro $\phi$ en el grado de daño promedio .....	66
Figura 4.1. Mapa geológico de la provincia de Málaga (Serrano y Guerra, 2005).....	74
Figura 4.2a. Microzonación sísmica de la ciudad de Málaga en función del coeficiente C (Clavero y Ramos, 2005) . El recuadro señala la zona centro de Málaga de este estudio .....	76
Figura 4.2b. Microzonación de todo el distrito de Málaga en términos de amplificación de intensidad macrosísmica obtenida por Macau (2008). El recuadro señala la zona centro de Málaga de este estudio .....	76
Figura 4.3. Localización de las medidas de ruido sísmico realizadas en la ciudad de Málaga (Macau, 2008) .....	78
Figura 4.4. Localización de las medidas de ruido sísmico del centro de la ciudad de Málaga utilizadas en este trabajo .....	79



Figura 4.5. Cociente espectral H/V obtenido a partir de la técnica de Nakamura.....	81
Figura 4.6. Frecuencias fundamentales del suelo (en Hz), en el centro de Málaga obtenidas a partir del método de Nakamura. “R” indica las medidas con frecuencias fundamentales de más de 5.0Hz, consideradas como emplazamientos en roca .....	82
Figura 4.7. Localización de los sondeos geotécnicos realizados en la ciudad de Málaga por la empresa LIDYCCE. El recuadro marca la zona de estudio .....	84
Figura 4.8. Acelerograma IM1 utilizado en este estudio como registro de aceleración en roca en <i>ProShake</i> .....	86
Figura 4.9. Frecuencias fundamentales del suelo obtenidas con Nakamura (en azul), y <i>ProShake</i> (en negro). Los valores subrayados indican los sondeos modelo de cada subzona. “R” denota los emplazamientos en roca, con frecuencias mayores de 5.0Hz .....	87
Figura 4.10. Amplificaciones del suelo en términos de intensidad ( <i>ProShake</i> ). Los valores subrayados marcan los sondeos modelo de cada subzona, y los valores en azul corresponden a las medidas de ruido sísmico.....	88
Figura 4.11. Microzonación del centro de Málaga y frecuencias fundamentales de las columnas de suelo ( <i>ProShake</i> , en negro), y las medidas de ruido sísmico (Nakamura, en azul), analizadas en este estudio. Se subrayan las columnas modelo de cada subzona .....	91
Figura 4.12. Funciones de transferencia de las columnas modelo de cada subzona (obtenidas con <i>ProShake</i> ), y frecuencias fundamentales (Nakamura) en emplazamientos cercanos a los sondeos geotécnicos .....	93
Figura 4.13. Microzonación del centro de Málaga y amplificaciones del suelo (en negro). Los valores en azul corresponden a las medidas de ruido sísmico. Se subrayan las columnas modelo de cada subzona.....	95
Figura 4.14. Microzonación del centro de Málaga y amplificaciones del suelo en términos de intensidad (en negro). Los valores en azul corresponden a las medidas de ruido sísmico. Se subrayan las columnas modelo de cada subzona.....	96
Figura 4.15. Microzonación del centro de Málaga y profundidades del basamento rocoso (en m, en negro). Los valores en azul corresponden a las medidas de ruido sísmico. Se subrayan las columnas modelo de cada subzona .....	97
Figura 4.16. Amplificaciones del suelo de las columnas modelo frente a la frecuencia fundamental para la nueva microzonación.....	98
Figura 4.17. Amplificaciones del suelo en términos de intensidad de las columnas modelo frente a la frecuencia fundamental para la nueva microzonación.....	98
Figura 4.18. Funciones de transferencia de las columnas modelo de cada subzona de la nueva microzonación. Los triángulos corresponden a las frecuencias de Nakamura .....	99
Figura 4.19a. Microzonación del centro de Málaga de este estudio y la de toda la ciudad (Clavero y Ramos, 2005; Macau, 2008) .....	104
Figura 4.19b. Microzonación del centro de Málaga y grados de daño en los monumentos durante el terremoto de 9/10/1680 (Goded, 2006) .....	105
Figura 4.20. Microzonación del centro de Málaga en cuanto a las amplificaciones del suelo en términos de intensidad.....	106
Figura 4.21. Comparación entre la microzonación del centro de Málaga de este estudio y la de todo el distrito de Málaga obtenida por Macau (2008), en términos de amplificación de intensidad macrosísmica .....	107
Figura 4.22. Localización de la estación EMAL y el sismo de Málaga utilizado como función de Green empírica .....	109

Figura 4.23. Sismograma correspondiente al terremoto de Málaga de 21/11/2002 ( $m_b=4.1$ , $h=91\text{km}$ ) .....	110
Figura 4.24. Sismograma utilizado como EGF ( $M_w=4.3$ ) (a), sismograma teórico generado para un sismo de $M_w=5.5$ (b), STF utilizada (c), y espectros de desplazamiento de la EGF (en rojo), y el registro teórico (en negro) (d) (componente este-oeste).....	111
Figura 4.25. Registros de aceleración para la función de Green empírica y el registro teórico de $M_w=5.5$ (componente este-oeste) .....	111
Figura 4.26. Componentes este-oeste, norte-sur y vertical del sismograma teórico de $M_w=5.5$ obtenido mediante el método de las funciones de Green empíricas.....	112
Figura 4.27. Registros de aceleración para la función de Green empírica y el registro teórico de $M_w=7.0$ (componente este-oeste) .....	112
Figura 4.28. Modelos de tierra utilizados en la región de Málaga. Distribución de velocidades a la izquierda y densidades a la derecha .....	115
Figura 4.29. Epicentros y mecanismos focales utilizados (Fresno, 2004), y localización de la estación utilizada .....	116
Figura 4.30. Componentes verticales de los desplazamientos observado (negro) y teórico (rojo), para el terremoto del 24/08/02 y la estación de EMAL. Las cuatro figuras corresponden a los cuatro modelos de tierra utilizados.....	117
Figura 4.31. Componentes verticales de los desplazamientos observado (negro) y teórico (rojo), para el terremoto del 21/11/02 y la estación de EMAL. Las cuatro figuras corresponden a los cuatro modelos de tierra utilizados.....	117
Figura 4.32. Acelerogramas teóricos para el terremoto de Málaga de 1680 a partir del escenario sísmico del sismo de 24/08/02 ( $h=60\text{km}$ ) y con una magnitud $M_w=7.0$ (modelo MAL4).....	120
Figura 4.33. Acelerogramas teóricos para el terremoto de Málaga de 1680 a partir del escenario sísmico del sismo de 21/11/02 ( $h=90\text{km}$ ) y con una magnitud $M_w=7.0$ (modelo MAL4).....	120
Figura 4.34a. Acelerograma tomado de la base de datos europea de movimientos fuertes ( $M_w=5.4$ , componente vertical).....	121
Figura 4.34b. Acelerogramas teóricos a partir del método EGF, para las magnitudes $M_w$ 5.5, 6.5 y 7.0 (componentes este-oeste) .....	121
Figura 4.34c. Acelerogramas teóricos a partir del método de la discretización del número de onda, para las magnitudes $M_w$ 5.5, 6.5 y 7.0 y profundidades de 60km y 90km (componentes este-oeste).....	122
Figura 4.35. Espectros de respuesta para distintos registros de aceleración obtenidos con diferentes metodologías, y espectros de respuesta de la norma NCSE-02 y el Eurocode 8. Los registros se numeran de acuerdo a la tabla 4.18.....	124
Figura 4.36. Registro IM2 de aceleración en roca (método <i>EGF</i> , $M_w=5.5$ ) .....	125
Figura 4.37a. Funciones de transferencia para los registros IM1 e IM2 de aceleración en roca, para cada una de las columnas modelo de cada zona. Zonas A, B1 y B2.....	126
Figura 4.37b. Funciones de transferencia para los registros IM1 e IM2 de aceleración en roca, para cada una de las columnas modelo de cada zona. Zonas B3, B4 y C .....	127
Figura 4.38. Frecuencias fundamentales de las columnas de suelo obtenidas con <i>ProShake</i> , frente a las frecuencias de Nakamura de las medidas de ruido más cercanas a éstas. Se muestran sólo las columnas modelo de cada zona.....	131
Figura 5.1. Microzonación del centro de Málaga en función de las amplificaciones del suelo en términos de intensidad. Se señalan las cuatro parroquias de Málaga en 1680.....	136

Figura 5.2. Localización de todos los monumentos de Málaga (clasificados según su grado de daño y tipología), dañados en el terremoto de 1680.....	139
Figura 5.3. Clasificación de los monumentos según su siglo de construcción.....	142
Figura 5.4. Tipologías de los monumentos de Málaga.....	142
Figura 5.5. Microzonación del centro de Málaga y monumentos dañados en el terremoto de 1680. Las referencias de los monumentos corresponden a la tabla 5.5.....	144
Figura 5.6. Representación del grado de daño asignado en el sismo de 1680 frente a la frecuencia fundamental según la subzona, para los monasterios (arriba) y las iglesias (abajo), dañadas en 1680. En triángulos se representan los monumentos cuyo grado de daño fue evaluado con calidades $\alpha$ y $\beta$ , y en cuadrados los evaluados con calidad $\gamma$ (Goded, 2006) .....	146
Figura 5.7a. Clasificación de los monumentos según su índice de vulnerabilidad .....	147
Figura 5.7b. Distribución de los índices de vulnerabilidad de los monumentos sobre el plano de la ciudad de Málaga .....	148
Figura 5.8a. Curvas de vulnerabilidad para las iglesias y comparación con los daños en 1680.....	150
Figura 5.8b. Curvas de vulnerabilidad para los monasterios y comparación con los daños en 1680.....	150
Figura 5.8c. Curvas de vulnerabilidad para los castillos y comparación con los daños en 1680.....	151
Figura 5.8d. Curvas de vulnerabilidad para los palacios y comparación con los daños en 1680.....	151
Figura 5.9. Curvas de vulnerabilidad de las iglesias de Málaga y comparación con los daños en 1680: con la microzonación propuesta (a), sin efectos de suelo (b), y con una microzonación dividida en roca y suelo (c). Los monumentos de 1680 se muestran con distinto color según la calidad asignada al grado de daño.....	153
Figura 5.10a. Curvas de vulnerabilidad de las iglesias de Málaga y comparación con los daños en 1680, utilizando los acelerogramas IM1 (superior), e IM2 (inferior). Los monumentos de 1680 se muestran con distinto color según la calidad asignada al grado de daño.....	155
Figura 5.10b. Curvas de vulnerabilidad de los monasterios de Málaga y comparación con los daños en 1680, utilizando los acelerogramas IM1 (superior), e IM2 (inferior). Los monumentos de 1680 se muestran con distinto color según la calidad asignada al grado de daño .....	156
Figura 5.11a. Curvas de vulnerabilidad individuales de las iglesias y comparación con los daños en 1680 (1). El símbolo fucsia representa la microzonación en dos zonas, el violeta el caso sin microzonación y en azul con las seis subzonas propuestas.....	157
Figura 5.11b. Curvas de vulnerabilidad individuales de las iglesias y comparación con los daños en 1680 (2). Los símbolos igual que en la figura 5.11a .....	158
Figura 5.11c. Curvas de vulnerabilidad individuales de las iglesias y comparación con los daños en 1680 (3). Los símbolos igual que en la figura 5.11a .....	159
Figura 5.11d. Curvas de vulnerabilidad individuales de los monasterios y comparación con los daños en 1680. Los símbolos igual que en la figura 5.11a.....	160
Figura 5.11e. Curvas de vulnerabilidad individuales de castillos (superior), y palacios (inferior), y comparación con los daños en 1680. Los símbolos igual que en la figura 5.11a.....	161
Figura 5.12. Curvas de vulnerabilidad de la iglesia del convento de la Compañía de Jesús, con su tipología actual de iglesia (superior), y con la tipología de monasterio de 1680 (inferior) ..	165

Figura 5.13. Ejemplos de comparación de las curvas de vulnerabilidad individuales utilizando los acelerogramas IM1 e IM2 para una iglesia (superior), un monasterio (intermedio), y un palacio (inferior).....	167
Figura 5.14. Distribución de los grados de daño promedio en los monumentos de Málaga dañados en 1680.....	168
Figura 5.15. Grados de daño promedio y comparación con los daños en el terremoto de 1680.....	169
Figura 5.16. Grados de daño promedio esperados y daños observados en el terremoto de 1680 para cada uno de los monumentos, según su tipología. *: clase B; **: clase C.....	170
Figura 5.17. Probabilidades de daño de los monumentos de Málaga utilizando los índices de vulnerabilidad inferior (arriba), medio (intermedio) y superior (abajo).....	172
Figura 5.18. Grado de daño más probable (índice de vulnerabilidad medio), frente al grado de daño observado en el sismo de 1680.....	174
Figura 6.1. Microzonación del centro de Málaga y monumentos de estudio, clasificados según su tipología estructural. En rosa se marcan los edificios que existían en 1680 y en morado los nuevos .....	181
Figura 6.2. Clasificación de los monumentos según su siglo de construcción (escenarios) .....	182
Figura 6.3. Tipologías de los monumentos de Málaga (escenarios) .....	183
Figura 6.4a. Clasificación de los monumentos según su índice de vulnerabilidad (escenarios) .....	184
Figura 6.4b. Distribución de los índices de vulnerabilidad de los monumentos sobre el plano de la ciudad de Málaga (escenarios) .....	185
Figura 6.5. Intensidades esperadas en la ciudad de Málaga para un terremoto como el de 1680 (modificado a partir de Irizarry <i>et al.</i> , 2007).....	186
Figura 6.6. Monumentos de Málaga en el escenario determinista basado en el terremoto de 1680.....	189
Figura 6.7. Distribución de los grados de daño promedio en los monumentos de Málaga (escenario 1680).....	190
Figura 6.8. Monumentos con mayores grados de daño promedio a partir de los índices de vulnerabilidad medios (escenario 1680) .....	191
Figura 6.9. Probabilidades de daño utilizando los índices de vulnerabilidad inferior (arriba), medio (intermedio) y superior (abajo) (escenario 1680).....	192
Figura 6.10a. Monumentos con mayores probabilidades de daño promedio a partir de los índices de vulnerabilidad medios (escenario 1680).....	194
Figura 6.10b. Monumentos con mayores probabilidades de daño promedio a partir de los índices de vulnerabilidad superiores (escenario 1680).....	194
Figura 6.11. Distribución de los grados de daño medio más probables de los monumentos sobre el plano de la ciudad de Málaga (escenario 1680) .....	195
Figura 6.12. Comparación entre los grados de daño medios más probables y los daños observados en 1680 (escenario 1680) .....	196
Figura 6.13. Monumentos de Málaga en el escenario probabilista basado en la norma sismorresistente NCSE-02.....	201
Figura 6.14. Distribución de los grados de daño promedio en los monumentos de Málaga (escenario NCSE-02) .....	202

Figura 6.15. Monumentos con mayores grados de daño promedio a partir de los índices de vulnerabilidad medios (escenario NCSE-02) .....	203
Figura 6.16. Probabilidades de daño utilizando los índices de vulnerabilidad inferior (arriba), medio (intermedio) y superior (abajo) (escenario NCSE-02) .....	204
Figura 6.17a. Monumentos con mayores probabilidades de daño promedio a partir de los índices de vulnerabilidad medios (escenario NCSE-02) .....	205
Figura 6.17b. Monumentos con mayores probabilidades de daño promedio a partir de los índices de vulnerabilidad superiores (escenario NCSE-02) .....	205
Figura 6.18. Distribución de los grados de daño medio más probables de los monumentos sobre el plano de la ciudad de Málaga (escenario NCSE-02) .....	207
Figura 6.19. Comparación entre los grados de daño medios más probables y los daños observados en 1680 (escenario NCSE-02) .....	208

---

---

## *Summary*

---



The aim of this work is to obtain a damage evaluation of Málaga's historical monuments before the occurrence of destructive earthquakes in the region. The results obtained can be applied on the maintenance of the city's artistic and cultural heritage as well as in emergency planning.

The dissertation starts from a study of the historical earthquakes occurred in the past in the city of Málaga. In spite of the present low-to-moderate seismicity ( $M \leq 5.0$ ), the province of Málaga, and especially its capital, has suffered three large earthquakes during its history with epicentres at less than 30km from Málaga city: the 1494 ( $I_{\max} = \text{VIII}$ ), 1581 ( $I_{\max} = \text{VII}$ ), and 1680 ( $I_{\max} = \text{VIII-IX}$ ) events. While the 1581 earthquake seems to have caused just a big fright in the city, the 1494 and 1680 earthquakes almost destroyed the city. Especially significant for the monuments was the 1680 event, where there is information of the damages caused to 36 historical buildings in the city. Most of these monuments suffered severe damage or were completely destroyed.

A seismic risk study of Málaga's city centre has been done, focused on the analysis of its main monuments. The work is divided in three main parts: site effects, vulnerability and the generation of two seismic scenarios in the city. One of the main objectives of this study is to be aware of what kind of damages can be expected in Málaga's historical and cultural heritage if big earthquakes such as the 1680 event ever happen again in the region.

A seismic microzonation of the whole city, based on geological and topographical information (Clavero y Ramos, 2005), has been used as the start point in the site effects study. Ambient noise measurements have been taken in the city centre to obtain soil's fundamental frequencies using Nakamura's technique (Nakamura, 1989). The use of geotechnical data provided by LIDYCCE (LIDYCCE, 2005), has been used in a 1D numerical method (ProShake, 2000), to obtain soil's transfer functions as well as its intensity amplifications. This information has been used to propose a seismic microzonation of the city centre, classified in six types of soils. Three of these soils are



new respect to the previous microzonation, with high intensity amplifications (+1.0 to +1.5), belonging to transition zones between the rock at the East and the sedimentary soils near the Guadalmedina river, at the West. These regions correspond to the areas where the highest damages to monuments took place in the 1680 earthquake. The results obtained show a great consistency in the fundamental frequencies between the experimental Nakamura's technique and the numerical 1D method. These frequencies vary from above 5.0Hz at the East, where there is rock at the surface, and 1.0Hz for the sedimentary soils at the West.

At the numerical method, an accelerogram in rock is necessary as an input to obtain the soil transfer functions. Three different techniques have been used to obtain this accelerogram. First, an accelerogram has been chosen from the European strong-motion database (Ambraseys *et al.*, 2000), with similar response spectra to the one proposed for Málaga by the Spanish Seismic Code (NCSE-02). Second, synthetic accelerograms with magnitudes  $5.5 < M_w < 7.0$  have been generated from smaller shocks used as empirical Green functions (*EGF* method, Hartzell, 1978). Finally, the wavenumber discretization method (*WD*, Bouchon and Aki, 1977), has been used (using 1D structure models), to obtain the third accelerogram in rock to use as an input in *ProShake*.

From the *WD* technique, promising comparisons have arisen at regional distances for frequencies up to  $\sim 0.5$ Hz. At higher frequencies, a detailed knowledge of the structure is necessary and 2 or 3D modelling is more appropriate. The loss of high frequencies and high amplitudes, essential in seismic risk studies, has made it impossible to use these accelerograms, which are inadequate to obtain realistic soil amplification results.

The *EGF* methodology also has a decrease of high frequencies, though not as much as in the *WD* technique. This record has been unable to reproduce the 1680 earthquake damages to the Málaga monuments. High frequencies for this accelerogram could be obtained using hybrid techniques, which use empirical Green functions for low frequencies and stochastic techniques for high frequencies (as in Mena *et al.*, 2006). Only the accelerogram taken from the European strong-motion database has proved to be good enough for the generation of a realistic microzonation in the centre of Málaga, and its application in the vulnerability analysis.

Seismic vulnerability of the 19 monuments damaged in the 1680 event and still existing has also been analyzed. The vulnerability index method (VI, Corsanego and Petrini, 1994) has been used. This method has been developed using statistical data taken from monuments damaged in Italy for the past 30 years, mostly buildings and churches. The historical buildings studied correspond to four different typologies, each with a different vulnerability index. Depending on the general building status (state of maintenance, recent interventions, etc.), or specific characteristics according to its typology (plan and section regularities, height of the walls, existence of arcs or domes, etc.), different modifiers are given to each vulnerability index. Using these parameters and the intensity affecting each monument (according to the microzonation proposed), expected damage grades have been obtained for each monument, as well as the vulnerability curves for every typology and individual monument.

A good consistency has been found between the monuments' vulnerability results and the observed damages in the 1680 event, especially for the churches, where the expected damages completely match with the observed ones for most cases. Three monuments have not been able to fit the observed damages: Málaga's Cathedral and the two castles, most probably due to the typology's misfit between Italian and Spanish monuments rather than to the methodology used. We propose to add a "Cathedral" typology to the ones proposed in the VI technique, as this kind of buildings are usually built with better materials than churches, being less vulnerable to earthquakes. The two Muslim castles studied (from the 11<sup>th</sup> century), are much older and probably built with poorer materials than the Italian ones, increasing their vulnerability.

The agreement obtained between expected and observed damages shows that the VI technique, based on Italian buildings, can be applied to Spanish monuments. The influence of the site effects in the vulnerability results has been tested. Three cases have been studied: using the proposed microzonation in six soils, with a simplified microzonation soft soil/rock, and with no microzonation at all. The test shows the need of using site effects to obtain realistic vulnerability results.

Two seismic scenarios have been proposed for the city of Málaga, one deterministic based on the 1680 earthquake, and a probabilistic one based on the Spanish seismic code. Seismic vulnerability of 54 monuments (historical and modern buildings), in the city have been analyzed within these two scenarios. The monuments

include the 19 buildings studied previously added to 35 new monuments built after the 1680 event which are part of Malaga's historical heritage. Using the *VI* methodology, expected mean damage grades as well as its probabilities have been obtained.

Both scenarios show worrying results, with moderate probabilities of expected collapse or severe damage in some monuments. Nevertheless, the deterministic scenario based on the 1680 shock is clearly more catastrophic than the probabilistic one based on the Spanish seismic code. The 1680 event characteristics (with an EMS-98 intensity of VIII-IX in Málaga city and an epicentral distance of 22km), as well as the high amplification factors in the city centre have turned this earthquake into a highly destructive event for the city.

Finally, the most vulnerable of the monuments studied within the two scenarios belong to the typologies of churches, chapels and towers. We highly recommend the necessary measurements to be taken in this kind of buildings for their maintenance and preservation, in the hope of trying to avoid possible damages if future earthquakes such as the 1680 event ever occur.

---

# *Capítulo 1*

## *Introducción*

---



El objetivo básico de la tesis es analizar la peligrosidad sísmica a escala local del centro histórico de Málaga y realizar un estudio de la vulnerabilidad de sus edificios históricos y monumentos. Se pretende responder a la pregunta de qué tipo de daños podrían tener dichas estructuras en caso de producirse un terremoto como el de 1680. Asimismo, se pretende conocer cómo un sismo de estas características afectaría al centro de Málaga, que comprende su casco histórico y coincide con la ciudad en el siglo XVII. Por último, se propondrán dos escenarios sísmicos para la ciudad, uno determinista basado en el terremoto de 1680, y un escenario probabilista basado en la Norma de Construcción Sismorresistente española (NCSE-02).

El estudio del riesgo sísmico constituye uno de los objetivos de la sismología. Su finalidad es disminuir y mitigar los efectos de un posible terremoto sobre la población, los edificios y el patrimonio histórico, así como los costes económicos. Su interés es evidente en aquellas regiones sísmicamente activas y con mayor riesgo de sufrir sismos. En un estudio de riesgo sísmico se abordan tres etapas claramente diferenciadas: la peligrosidad sísmica, la vulnerabilidad y la estimación de las pérdidas.

La peligrosidad clasifica las distintas regiones según su probabilidad de sufrir terremotos, y constituye la base de los estudios de riesgo sísmico. Analiza la sismicidad de una zona en base a los terremotos que han ocurrido en el pasado y a los aspectos geológicos, geotécnicos y topográficos del terreno.

La vulnerabilidad sísmica estudia los edificios existentes en la región de estudio, y su mayor o menor propensión a sufrir daños sísmicos. Se analizan las características de los edificios, tales como su edad, altura, estado de mantenimiento, reformas realizadas, etc., para obtener, como resultado final, los grados de daños que pueden esperarse en los mismos en caso de producirse un terremoto de una determinada intensidad en la región.

Por último, se suele realizar una estimación de las pérdidas humanas y económicas que podría acarrear la ocurrencia de un terremoto en la zona, siendo ésta la última etapa de un estudio de riesgo sísmico.

La principal causa de las pérdidas producidas por los terremotos se debe al inadecuado comportamiento de las estructuras. Dado que la peligrosidad no se puede modificar, es en la vulnerabilidad en la que deben ahondarse los esfuerzos: sólo es posible reducir el riesgo sísmico disminuyendo la vulnerabilidad de los edificios (Pérez-Ruiz *et al.*, 2007).

Si bien éstos tres constituyen los aspectos fundamentales de los estudios de riesgo sísmico, otros factores deben tenerse en cuenta. La memoria sísmica de la población, por ejemplo, puede tener una decisiva influencia sobre la vulnerabilidad de los edificios: en las regiones en que se producían grandes sismos, se aprendía de los mismos, desarrollando las técnicas de refuerzo adecuadas en construcciones posteriores. Sin embargo, estas lecciones aprendidas se iban perdiendo tras pocas generaciones, lo que supone el aumento innecesario de la vulnerabilidad (Lagomarsino, 2006). Por otro lado, se tiene constancia de que existen algunas regiones en que la población ha conservado durante siglos el recuerdo (a menudo mediante rituales religiosos que se han mantenido en la tradición popular), de algún sismo pasado del que no se tiene constancia en los catálogos sísmicos (Castelli, 2006). Este sorprendente hecho debería tenerse en cuenta y fomentar la revisión de los catálogos mediante estudios de sismicidad histórica, pues un buen conocimiento de la sismicidad de cada región es vital para realizar un estudio realista del riesgo sísmico.

A pesar del aumento de los estudios de este tipo en los últimos años, solamente unos pocos países ricos han sido capaces de reducir su riesgo sísmico, mientras que la gran mayoría ha conseguido pocos progresos, y en algunas áreas el riesgo ha ido incluso en aumento (Spence, 2007). Este preocupante dato se debe en gran medida al enorme crecimiento de las ciudades en las últimas décadas (a menudo desordenado y caótico), que provoca el aumento de la vulnerabilidad y con ello el del riesgo sísmico.

La mayor parte de los estudios de riesgo sísmico centran sus esfuerzos en estudiar los edificios ordinarios de las poblaciones, obteniendo resultados globales del riesgo esperable en la región, siempre en términos probabilísticos. Los edificios

ordinarios constituyen una de las principales causas de la pérdida de vidas humanas así como la existencia de heridos tras un sismo, provocados por los derrumbes totales o parciales de las estructuras. Asimismo, una gran proporción del presupuesto destinado a reconstruir una región tras un terremoto va dirigido a los edificios ordinarios.

La importancia de los estudios de vulnerabilidad de otro tipo de edificios se ha puesto de relieve en los últimos años. En especial, deben destacarse los llamados edificios esenciales (hospitales, sedes de bomberos, policía, Protección Civil, etc.), básicos en las gestiones de emergencia y cuyo buen funcionamiento tras producirse un sismo es vital para evitar mayores pérdidas humanas y económicas.

Los edificios históricos y monumentales también merecen la atención necesaria para evitar su posible pérdida producida por terremotos en el futuro. Estas estructuras, a menudo de muchos siglos de antigüedad, pueden ser extremadamente vulnerables y carecer de técnicas de refuerzo adecuadas a la sismicidad de la región. Por tanto, este tipo de edificios, que forman parte del patrimonio histórico, artístico y cultural, deben ser debidamente analizados con el fin de disminuir su vulnerabilidad sísmica. Los terremotos italianos de Friuli (1976), y Umbria-Marche (1996, 1997) dañaron gravemente las estructuras monumentales italianas. Estos sismos sirvieron para mostrar a la comunidad científica cuán vulnerables podían ser los monumentos que forman parte de nuestro patrimonio. Ello hizo que comenzaran a realizarse análisis de los daños sufridos y que surgieran metodologías para el estudio de la vulnerabilidad en este tipo de estructuras.

El reciente terremoto de Italia de abril de 2009, que afectó especialmente a la ciudad de L'Aquila, ha causado daños muy graves en los monumentos de la región, poniendo de manifiesto que aún queda mucho por hacer. Los daños en el patrimonio histórico y artístico no deberían medirse en términos económicos, pues la pérdida de pinturas, fachadas, torres o cúpulas, a menudo construidas por grandes maestros del Quattrocento o Cinquecento italianos, es de un valor incalculable. Sirvan como ejemplo los daños en la Basílica de *Santa Maria di Collemaggio* (del siglo XIII, colapsada en su mayor parte), el castillo del siglo XVI *Forte Spagnolo* (cuya tercera planta quedó completamente destruida), la iglesia dieciochesca de Santa Agustina (cuya cúpula fue colapsada), la Basílica de San Bernardino de Siena (cuyo ábside fue seriamente



dañado), o la iglesia de *Anime Sante* (siglo XVIII, cuya cúpula se vino abajo) (MCEER, 2009).

En el caso de España, existe un patrimonio histórico importante y de gran valor. Éste es el caso de la ciudad de Málaga, situada en una región de sismicidad moderada, pero que ha sufrido tres grandes terremotos en el pasado con epicentros en la provincia malagueña, en los años 1494 ( $I_{\max}=\text{VIII}$ ), 1581 ( $I_{\max}=\text{VII}$ ), y 1680 ( $I_{\max}=\text{VIII-IX}$ ).

El sismo de 1581 parece haber afectado solamente a la ciudad de Málaga, conociéndose los efectos en algunos monumentos tales como la iglesia de los Santos Mártires. Sin embargo, fueron los sismos de 1494, y especialmente el de 1680, los que aparecen catalogados como catastróficos en los documentos históricos, formando ambos parte del catálogo de los terremotos más importantes de la Península Ibérica del Instituto Geográfico Nacional (I.G.N.).

La existencia de estos terremotos del pasado en la ciudad de Málaga y los daños causados en su patrimonio histórico hacen plantearse la pregunta de cuán vulnerables son ahora los monumentos de la ciudad y qué les podría suceder si volviera a producirse un terremoto como el de 1680.

### **Estudios de riesgo sísmico en España**

Los primeros estudios de riesgo sísmico en España son los realizados por Muñoz (1983), Bisbal (1984) y Martín Martín (1984). Este tipo de estudios ha aumentado en los últimos veinte años, en los que se ha puesto un considerable empeño en tratar de conocer la peligrosidad sísmica de cada región y tratar de mitigar los daños mediante estudios de vulnerabilidad. Asimismo, en los últimos cinco años han comenzado a realizarse estudios de riesgo sísmico en colaboración con Protección Civil con el objetivo de elaborar planes de emergencia en las regiones de mayor peligro sísmico.

Cataluña es una de las Comunidades Autónomas mejor estudiadas (en especial la ciudad de Barcelona), sobre la que existen varios estudios en forma de artículos y tesis doctorales, tanto de peligrosidad como de vulnerabilidad sísmica o estimación de

pérdidas. Algunas de las tesis doctorales más recientes son Chávez Morillo (1998), Cid (1998), Coral (2002), Mena (2002), Bonett (2003), Irizarry (2004), Carreño (2006), Lantada (2007), Macau (2008) o Martínez Ruiz (2008). Destacan algunas tesis que constituyen una novedad en España, tales como Caicedo (1994), sobre la vulnerabilidad de edificios ordinarios en un barrio de Barcelona (el *Eixample*), o Safina (2003), sobre la vulnerabilidad de los edificios esenciales en Barcelona.

En cuanto al resto de publicaciones realizadas en Cataluña, algunas de las contribuciones más recientes son las de Jiménez *et al.* (2000), Torres-Vera y Canas (2003), Barbat *et al.* (2006), Roca *et al.* (2006), Barbat *et al.* (2008), Lantada *et al.* (2008) y Lantada *et al.* (2009). Otras regiones muy estudiadas desde el punto de vista del riesgo sísmico son Murcia (Bufo *et al.*, 2005; Benito *et al.*, 2006; Bufo *et al.*, 2006; Benito *et al.*, 2007; García-Mayordomo *et al.*, 2007; Gaspar-Escribano y Benito, 2007; Gaspar-Escribano *et al.*, 2008; Navarro *et al.*, 2008), Alicante (Delgado *et al.*, 2000; Sánchez Dulcet, 2003), y Almería (Navarro *et al.*, 2002; Navarro *et al.*, 2007). Destaca también un estudio reciente sobre el riesgo sísmico en la sierra de Lívar, entre las provincias de Cádiz y Málaga (Andreo *et al.*, 2006).

Los estudios de vulnerabilidad de monumentos en regiones españolas son extremadamente escasos en la actualidad. La gran mayoría de los estudios de vulnerabilidad realizados en España (que tampoco son muy abundantes y se centran en regiones muy concretas), se estudian los edificios ordinarios. Por el momento sólo se tiene constancia de la existencia de una tesis doctoral cuyo objetivo principal sea el estudio de este tipo de estructuras: Irizarry (2004), con un completo análisis de la vulnerabilidad de 68 monumentos de Barcelona, así como la reciente publicación de un artículo sobre el riesgo sísmico en Barcelona, que incluye estudios de vulnerabilidad tanto de edificios ordinarios como de monumentos (Lantada *et al.*, 2009).

### **Estructura de la tesis**

La organización de la tesis se ha realizado de tal forma que siempre aparecen diferenciadas las tres partes fundamentales de que consta este trabajo: peligrosidad sísmica a escala local (o efecto de sitio), vulnerabilidad de los monumentos de Málaga, y escenarios sísmicos.

La memoria se encuentra dividida en ocho capítulos y doce anexos.

El primer capítulo constituye esta introducción.

En el segundo capítulo se analizarán las características de la sismicidad de la región de Málaga, tanto histórica como instrumental. Se hará especial hincapié en los terremotos ocurridos en Málaga en 1494 y 1680, especialmente dañinos en la ciudad.

En el tercer capítulo se detallará la metodología utilizada en cada una de las tres partes de que consta la tesis. Se analizarán los conceptos básicos de los estudios de riesgo sísmico, encuadrando qué papel desempeñan en ellos los estudios de este trabajo. Además, se añadirá un pequeño glosario de conceptos básicos tanto de efecto de sitio como de vulnerabilidad.

El capítulo cuarto está dedicado al estudio del efecto de sitio en el casco histórico de Málaga. Partiendo de una microzonación sísmica realizada en todo el distrito de la ciudad (Clavero y Ramos, 2005), se realizará un estudio detallado del comportamiento sísmico de los distintos tipos de suelos en la zona centro, caracterizándolos mediante sus funciones de transferencia, y obteniendo las amplificaciones del suelo en términos de intensidad macrosísmica, así como las profundidades del basamento. Las frecuencias fundamentales se determinarán mediante dos metodologías distintas, una experimental y una numérica, comparando los resultados entre sí. A partir del análisis de toda esta información, se obtendrá una microzonación detallada del centro de Málaga, poniendo de relieve las zonas propensas a sufrir mayores amplificaciones del suelo.

Como acelerograma de entrada en roca, necesario en la aplicación del método numérico, se utilizarán registros obtenidos mediante tres vías distintas: utilizando registros tomados de la base de datos europea de movimientos fuertes de características parecidas a las propuestas para Málaga en la Norma de Construcción Sismorresistente española NCSE-02; obteniendo acelerogramas teóricos para un rango de magnitudes de  $5.5 < M_w < 7.0$  a partir de otro de menor tamaño registrado cerca de la ciudad, aplicando el método de las funciones de Green empíricas (Hartzell, 1978); y por último, generando un acelerograma teórico a partir del método de la discretización del número de onda (Bouchon y Aki, 1977). Se compararán los resultados obtenidos en los tres casos.

En el capítulo quinto se analizará la vulnerabilidad sísmica de aquellos monumentos que fueron dañados en el sismo de 1680 y existen en la actualidad. Aplicando el método de los índices de vulnerabilidad (Corsanego y Petrini, 1994), se obtendrán los grados de daño esperados para cada uno de ellos en caso de producirse un terremoto de las mismas características que el de 1680. Para ello, se utilizarán las amplificaciones del suelo en términos de intensidad obtenidas en el apartado de peligrosidad sísmica. Los resultados obtenidos se compararán con los daños observados en el siglo XVII. De esta forma se realizará una validación de la aplicación de esta metodología a monumentos españoles, ya que ésta está basada en el estudio del comportamiento de este tipo de estructuras en Italia.

En el sexto capítulo se analizarán dos escenarios sísmicos en la ciudad: un escenario determinista basado en el terremoto de 1680, y uno probabilista basado en la norma NCSE-02. Estos escenarios se aplicarán a los monumentos del capítulo anterior. Además, se añadirán otros monumentos posteriores a 1680 que forman parte del patrimonio histórico y cultural malagueño, formando un total de 54 monumentos. Aplicando de nuevo el método de los índices de vulnerabilidad, se obtendrán los grados de daño esperados para cada monumento así como sus probabilidades de daño. Los resultados finales se mostrarán en términos probabilísticos, en los que se indicará el porcentaje de edificios en que se esperan cada uno de los grados de daño definidos en la escala EMS-98 (*European Macroseismic Scale*). Los resultados de ambos escenarios se compararán entre sí, para determinar cuál de ellos predice mayores daños en los monumentos malagueños y qué tipología de monumento sería más propensa a sufrir daños más graves.

No se realizará un análisis de los costes económicos, puesto que este trabajo se centra en el estudio de la vulnerabilidad de los monumentos históricos, en los que resulta muy difícil evaluar las pérdidas económicas ocasionadas por los daños en este tipo de estructuras debidos a posibles terremotos en la región.

Los resultados más relevantes obtenidos en los estudios de efecto de sitio, vulnerabilidad y escenarios sísmicos se mostrarán en los capítulos cuarto, quinto y sexto en forma de gráficas, mapas GIS o tablas. El resto de los resultados se mostrarán en los anexos, al final de este trabajo.

En el séptimo capítulo se presentarán las principales conclusiones de este trabajo, indicando recomendaciones para estudios de este tipo en el futuro, y realizando una propuesta para trabajos futuros.

El octavo capítulo corresponde a las referencias utilizadas en este trabajo.

Se incluyen además un resumen de esta tesis y un capítulo de conclusiones en inglés.

Por último, en forma de anexos (doce en total), se presentarán resultados adicionales a los mostrados en los capítulos de resultados (cuarto a sexto). Los anexos I-V corresponden a resultados de efecto de sitio, los anexos VI-IX al estudio de vulnerabilidad, y los anexos X-XII al análisis de los escenarios sísmicos.

Esta tesis forma parte de los resultados del proyecto ERSE (Escenarios Realistas de Riesgo Sísmico en España) (REN2003-5178-C03-01), financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (en la actualidad Ministerio de Ciencia e Innovación), el cual tenía como objetivo realizar una evaluación realista del riesgo sísmico en dos entornos diferentes, uno urbano (la ciudad de Málaga), y uno rural (la comarca de la Cerdaña, en el Pirineo oriental), en caso de sufrir un terremoto de magnitud moderada ( $5.0 < M_w < 6.5$ ).

---

---

## *Capítulo 2*

# *Sismicidad de la región de Málaga*

---



La mayor parte de la actividad sísmica de la Península Ibérica se localiza en el sur y es debida al contacto entre las placas de Eurasia y África, que se extiende desde las islas Azores hasta el estrecho de Gibraltar. Esta sismicidad está constituida principalmente por terremotos superficiales ( $h \leq 40 \text{ km}$ ) de magnitudes moderadas ( $M \leq 5.0$ ). Sin embargo, hay que destacar la existencia de terremotos a profundidades intermedias ( $40 \text{ km} < h \leq 150 \text{ km}$ ), con distribución de epicentros en dirección E-W en el golfo de Cádiz, y con orientación N-S en la zona oeste del mar de Alborán (figura 2.1). Por otro lado, en la zona sur de Granada, cerca de Dúrcal, se han producido algunos terremotos muy profundos ( $h \approx 650 \text{ km}$ ), uno de los cuales (29/3/1954), tuvo una magnitud de 7.0 (Bufo *et al.*, 1995). Otras zonas de la Península con actividad sísmica relevante son las regiones de Pirineos y Galicia, caracterizadas por sismos superficiales.

A pesar de esta sismicidad moderada, en la Península Ibérica y las zonas limítrofes han tenido lugar terremotos de magnitud superior a 6.0 en los últimos 40 años. Tal es el caso de la zona comprendida entre el oeste del cabo de San Vicente y el golfo de Cádiz, donde se produjeron los terremotos de 15/3/1964 ( $M_s=6.4$ ; Udías y López Arroyo, 1969), y 28/2/1969 ( $M_s=8.0$ ; López Arroyo y Udías, 1972), y donde recientemente ha ocurrido un terremoto de  $M_w=5.9$  (12/2/2007; Bufo *et al.*, 2007). También se han producido sismos importantes en la región de Argelia, como los de Orleansville (9/9/1954,  $M_s=6.5$ ), El Asnam (10/10/1980,  $M_s=7.3$ ) (Bufo *et al.*, 2004), Boumerdés (23/5/2003,  $M_w=6.8$ ) (Belazougui *et al.*, 2003; Yelles-Chaouche *et al.*, 2003), y Alhucemas, en el norte de Marruecos (26/5/1994,  $M_w=5.8$  (Bezzeghoud y Bufo, 1999), y 24/2/2004,  $M_w=6.2$  (Ait Brahim *et al.*, 2004)). Asimismo, cabe destacar la reciente actividad sísmica de la provincia de Murcia, donde ha habido varios terremotos de magnitudes moderadas en los últimos años: el 2/2/1999 ( $M_w=4.8$ ), el 6/8/2002 ( $M_w=4.7$ ), y el 29/1/2005 ( $M_w=4.5$ ) (Bufo *et al.*, 2005; Bufo *et al.*, 2006; Benito *et al.*, 2007), que pese a su magnitud moderada han producido importantes daños.



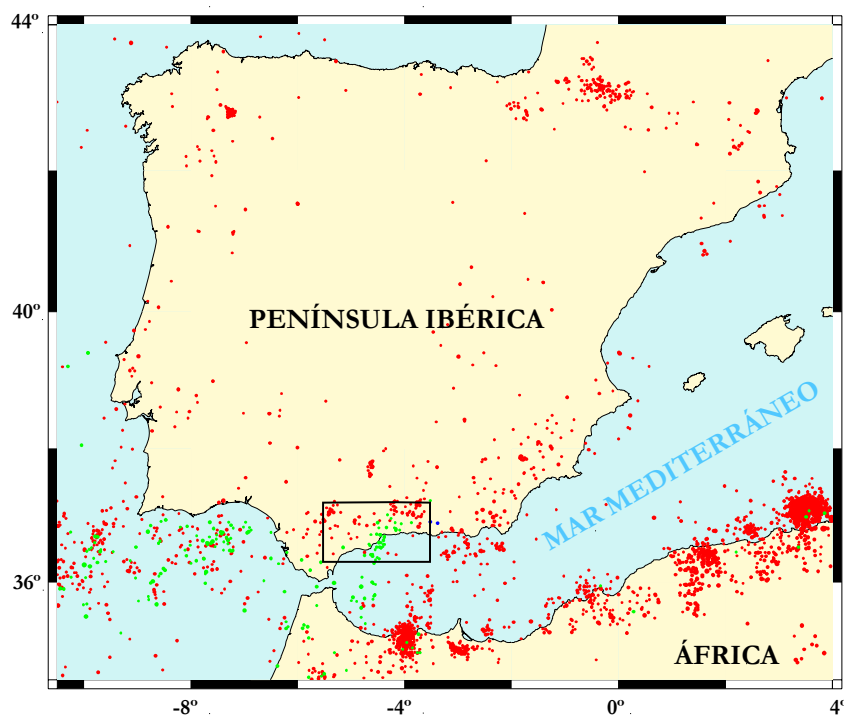


Figura 2.1. Sismicidad de la Península Ibérica ( $M \geq 3.5$ , 1980-2008; Banco de Datos Sísmicos del Instituto Geográfico Nacional). En círculos rojos los sismos superficiales ( $h \leq 40$  km), en círculos verdes los de profundidad intermedia ( $40\text{km} < h \leq 150\text{km}$ ), y en círculos azules los profundos ( $600\text{km} \leq h \leq 700\text{km}$ ).

En cuanto a la sismicidad histórica, en la Península Ibérica ha habido grandes terremotos con intensidad X o IX-X (escala MSK, *Medvedev*, *Sponheuer* y *Kárník*): el de Queralbs (Gerona), en 1428 (intensidad IX-X) (Banda y Correig, 1984), el llamado “gran terremoto de Lisboa” del 1 de noviembre de 1755 (intensidad X) (Martínez Solares, 2001; Martínez Solares y López Arroyo, 2004), el de 1829 en Torrevieja (Alicante) (intensidad IX-X) (Muñoz *et al.*, 1983; Rodríguez de la Torre, 1984), o el sismo de 1884 en Arenas del Rey (Granada) (intensidad IX-X) (Muñoz y Udías, 1981) (figura 2.2).

La provincia de Málaga se caracteriza por una actividad sísmica baja-moderada ( $M \leq 5.0$ ), con predominio de sismos de magnitudes menores de 3.0 (figura 2.3). Estos terremotos se producen en una zona compleja de la Península Ibérica delimitada por varias unidades tectónicas que incluyen las Béticas y el mar de Alborán. Numerosos estudios geofísicos han sido realizados en la zona, tanto para comprender la estructura cortical como la sismicidad (Torne *et al.*, 2000; Bufo *et al.*, 2004; Reicherter y Peters, 2005; Stich *et al.*, 2006; Fullea *et al.*, 2007; Pedrera *et al.*, 2009). La región forma parte

de la zona de transición entre las placas euroasiática y africana que, si bien está bien delimitada en su parte oceánica, al oeste del estrecho de Gibraltar, la zona este constituye una frontera difusa, entre los 3.5°E y los 12°W.

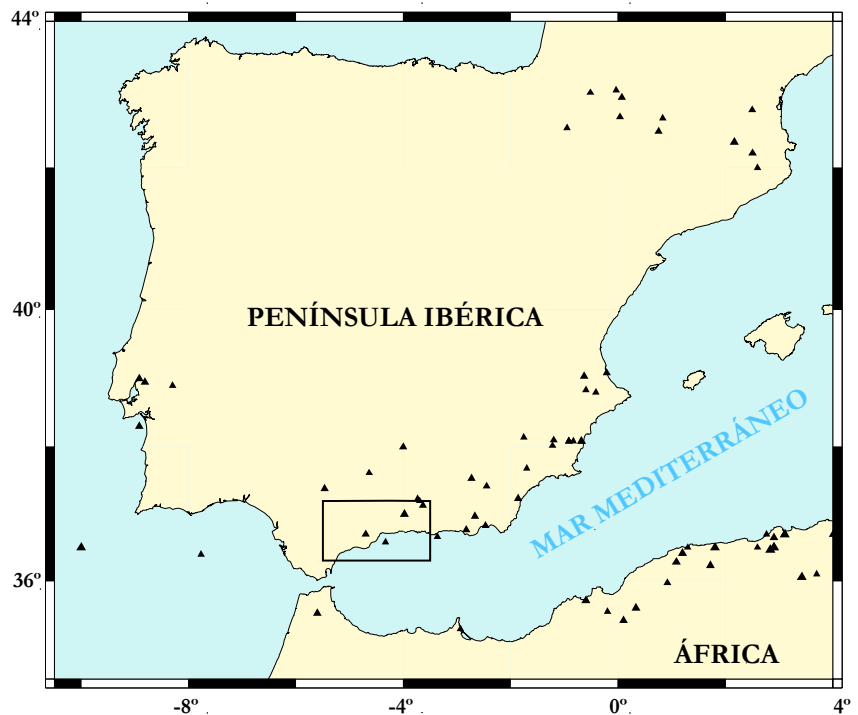


Figura 2.2. Sismicidad histórica de la Península Ibérica ( $I_{\max} \geq VIII$ , MSK; Banco de Datos Sísmicos del Instituto Geográfico Nacional).

Otra característica importante de la sismicidad en la zona malagueña es la ocurrencia de sismos a profundidades intermedias ( $40 < h \leq 150 \text{ km}$ ), concentrados en una estrecha franja de unos 50 km y orientación N-S centrada a unos 4.5°W y entre 35°N y 37°N de latitud, desde Málaga al norte a Marruecos al sur. En esta franja hay una gran concentración de terremotos de unos 100 km de profundidad, cuyos valores decrecen rápidamente hacia el este, siendo los sismos al este de los 3°W ya superficiales, con profundidades menores de 40 km (Bufo *et al.*, 2004). El estudio de los sismos intermedios de esta región ha dado lugar a numerosos trabajos, centrados tanto en la sismicidad (Munuera, 1963; Hartzfeld, 1978; Seber *et al.*, 1996; Serrano *et al.*, 1998; Gràcia *et al.*, 2006), como en el mecanismo focal (Hartzfeld y Frogneux, 1978; Bufo *et al.*, 1988, 1991 y 1997; Morales *et al.*, 1999; Bufo y Coca, 2002).

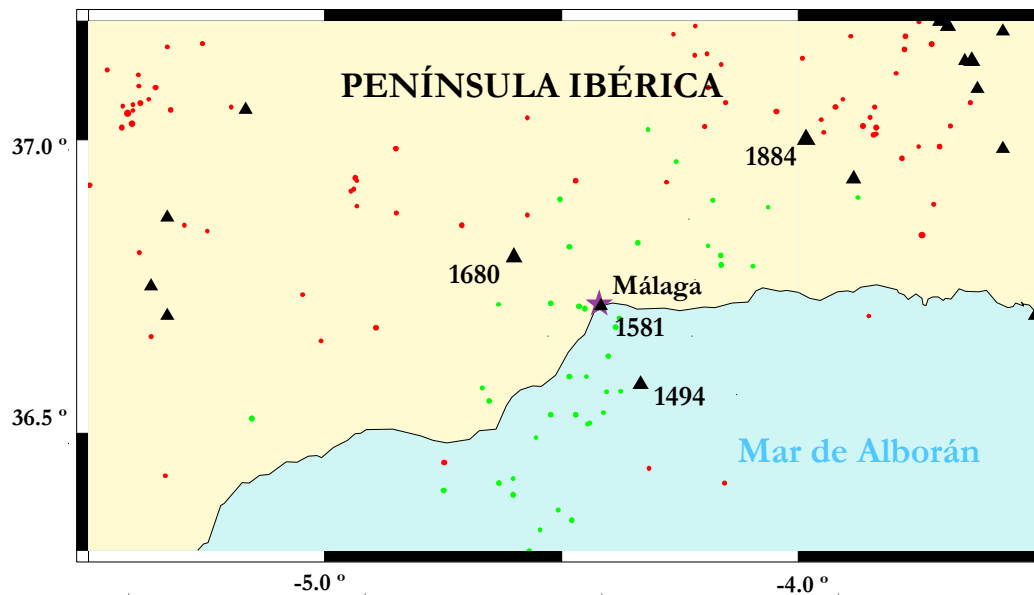


Figura 2.3. Sismicidad instrumental (1980-2008,  $M \geq 3.5$ ; círculos), e histórica ( $I_{\max} \geq VII$ , MSK; triángulos) en la zona de Málaga (Banco de Datos Sísmicos del Instituto Geográfico Nacional), correspondiente al recuadro marcado en las figuras 2.1 y 2.2. Los terremotos con mayor intensidad ocurridos en la zona se muestran con sus fechas.

A pesar de la sismicidad moderada característica de la zona, la provincia de Málaga ha sufrido tres terremotos de intensidades máximas mayores o iguales a VII en la escala EMS-98: los sismos del 26/1/1494 ( $I_{\max}=VIII$ ), el 18/6/1581 ( $I_{\max}=VII$ ), y el 9/10/1680 ( $I_{\max}=VIII-IX$ ) (Martínez Solares y Mezcua, 2002). Los tres sismos fueron especialmente dañinos en la ciudad de Málaga, y son los tres únicos terremotos catalogados con epicentros a menos de 30km de la ciudad (Banco de Datos Sísmicos del I.G.N.) (tabla 2.1). El terremoto de 1884 en Arenas del Rey (Granada), produjo grandes daños en los pueblos de la provincia de Málaga, en especial en la localidad de Periana, al NE de Málaga; por ello, en Málaga se lo conoce como el “terremoto de Periana”.

Tabla 2.1. Sismicidad histórica a distancias epicentrales inferiores a 90km de la ciudad de Málaga  
(Banco de Datos Sísmicos del I.G.N.)

Fecha	Hora	Latitud (°)	Longitud (°)	$I_{\max}$	x (km)	Localización
18/06/1581	7:30:00	36.72	-4.42	VII	0.5	Málaga
26/01/1494	20:00:00	36.58	-4.33	VIII	18.5	S Málaga
09/10/1680	7:00:00	36.80	-4.60	VIII-IX	21.9	NW de Málaga
25/12/1884	21:08:00	37.00	-3.98	IX-X	57.9	Arenas del Rey (Granada)
05/01/1885	17:35:00	37.00	-3.98	VII	57.9	Arenas del Rey (Granada)
27/02/1885	11:25:00	37.00	-3.98	VII	57.9	Arenas del Rey (Granada)

Los terremotos de Málaga de 1494 y 1680 han sido reevaluados recientemente a partir de nueva documentación encontrada, obteniéndose nuevos mapas de intensidades (Goded, 2006; Goded et al., 2008a). En ambos casos, la intensidad asignada a la ciudad de Málaga coincide con la máxima intensidad del evento, por lo que no sólo fueron terremotos destructivos en la provincia, sino que fueron especialmente dañinos en la capital malagueña. Ambos sismos forman parte del catálogo de los terremotos más importantes de la Península Ibérica del Instituto Geográfico Nacional (IGN, A).

Los principales resultados de esta reevaluación son:

El terremoto del 26 de enero de 1494 ( $I_{\max}$ =VIII), que fue sentido en Granada y Sevilla, produjo grandes daños en las poblaciones de la región, especialmente en los pueblos de la costa malagueña (figura 2.4a). Goded *et al.* (2008) obtuvieron un nuevo mapa de intensidades, interpretando que la distribución de intensidades podría indicar una correlación entre este sismo y alguna de las fallas de la región, de orientación NE-SW, de acuerdo con la distribución este-oeste de los daños en 1494. Asimismo, los mayores daños producidos en las localidades costeras y la alta atenuación de los mismos parecen indicar que se trató de un sismo superficial con epicentro marino. En la ciudad de Málaga ( $I$ =VIII, EMS-98), se destruyeron la mayor parte de las casas, y las torres y murallas de la ciudad sufrieron grandes daños. El convento de los Trinitarios quedó en tan mal estado que hubo que trasladarlo a otro lugar. Los Reyes Católicos prolongaron la franquicia de impuestos de la ciudad por dos años más para reparar los daños causados.

El 9 de octubre de 1680 se produjo otro fuerte terremoto en la provincia de Málaga que afectó a la mitad sur de la Península Ibérica, llegando incluso a sentirse en Madrid y Valladolid, donde se produjeron algunos daños (Muñoz y Udías, 1988). Se trató sin duda de uno de los sismos más destructivos en España, especialmente en la provincia de Málaga, donde 7 poblaciones fueron evaluadas con intensidad VIII-IX en la escala EMS-98 (Goded et al., 2008a), incluyendo la ciudad de Málaga (figura 2.4b). Este terremoto, que tuvo una gran repercusión en la época, es uno de los sismos españoles mejor documentados. De él se conservan actas capitulares, cédulas reales, actas notariales y una docena de relaciones escritas con ocasión del sismo.

La evaluación de los daños de este terremoto muestra una distribución de intensidades con una orientación N-S, y su foco fue más profundo que el de 1494. Muñoz y Udías (1988), le asignaron una profundidad de 50km basándose en la curva de atenuación obtenida así como en su amplia área de percepción. Posteriormente, esta profundidad intermedia fue corroborada por Goded *et al.* (2008), que le asignaron una profundidad de 40km. Diversos epicentros han sido propuestos para este terremoto por distintos autores, incluyendo un epicentro marino propuesto en el catálogo de tsunamis del I.G.N (IGN, B; recientemente retirado del catálogo). El estudio de la nueva información recopilada ha llevado a la conclusión de que la ocurrencia de un tsunami no está justificada en la documentación, tratándose, al parecer, de un terremoto de profundidad intermedia con epicentro terrestre al SW de la ciudad de Málaga.

El terremoto de 1680 produjo daños muy graves en la ciudad de Málaga (Muñoz y Udías, 1988; Goded et al., 2008a), con un 20% de casas completamente destruidas y un 30% inhabitables, y donde hubo al menos 70 muertos y 250 heridos. Especialmente dañados resultaron los barrios de los Santos Mártires y de San Juan, con un 25% de casas totalmente destruidas, y el arrabal del Perchel, al SW de la ciudad, una de las zonas más pobladas en la actualidad. La información encontrada para este terremoto es tan precisa que se pudo realizar un estudio individual de los daños producidos en 36 monumentos de la ciudad, sobre todo iglesias y conventos. De ellos, cuatro fueron completamente destruidos (grado de daño 5, escala EMS-98), y diecisiete fueron gravemente dañados (grado de daño 4), lo que da una idea del grado de destrucción sufrido en la ciudad.

Esta importante actividad sísmica ocurrida en el pasado no ha continuado en los últimos siglos. Especialmente tranquilos han sido los últimos 50 años, siendo en la actualidad la región de sismicidad constante pero baja-moderada. Sin embargo, recientemente ha habido dos terremotos de magnitudes moderadas (inferiores a 5.0), y profundidades intermedias (superiores a 50km) en la zona: el 24/08/02 y el 21/11/02, ambos a menos de 40km de Málaga. Estos terremotos se sintieron en la ciudad de Málaga, teniendo el sismo de noviembre una intensidad máxima de III (Banco de Datos Sísmicos del I.G.N.). La existencia de estos eventos así como la del terremoto de 1680, demuestran que los sismos de profundidad intermedia característicos de la zona deben tenerse en cuenta si se quiere realizar un estudio realista del riesgo sísmico en la región.

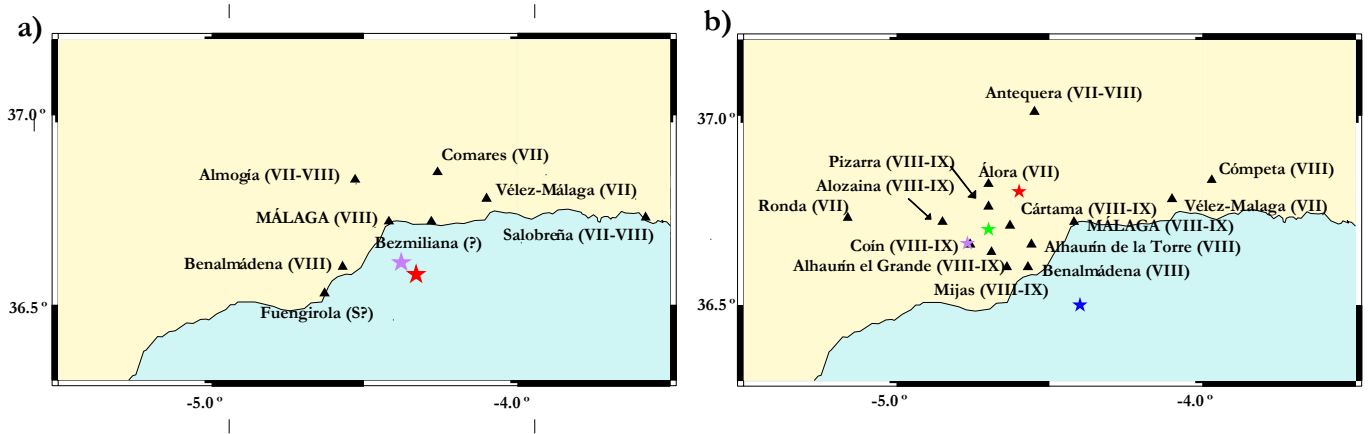


Figura 2.4. Mapas de intensidades para los sismos de 1494 (a) y 1680 (b). La zona mostrada corresponde al recuadro marcado en las figuras 2.1 y 2.2 (Goded et al., 2008a). Las estrellas corresponden a los epicentros propuestos por distintos autores: Martínez Solares y Mezcuca (2002) (en rojo); Muñoz y Udías (1988) (en verde); catálogo de tsunamis del I.G.N. (en azul); Goded *et al.* (2008) (en violeta). “S?” indica que el sismo probablemente se sintió en esa población; “?” denota a las poblaciones con información ambigua.



---

# *Capítulo 3*

## *Metodología*

---





En este capítulo se detallará la metodología utilizada en este estudio, tanto en el análisis del efecto de sitio como en la vulnerabilidad, así como la metodología seguida para obtener los dos escenarios sísmicos propuestos, uno determinista y otro probabilista.

En cada uno de los apartados de que consta este capítulo, se comenzará definiendo brevemente algunos conceptos básicos del riesgo sísmico a los que se hará referencia a lo largo del texto. Además, se realizará una pequeña introducción sobre la peligrosidad sísmica a escala regional y el estudio de la vulnerabilidad en edificios ordinarios.

### **3.1. Efecto de sitio**

#### **3.1.1. Definiciones de parámetros generales utilizados en efecto de sitio**

- *PGA (Peak Ground Acceleration), PGV (Peak Ground Velocity) y PGD (Peak Ground Displacement)*: parámetros máximos de la aceleración, la velocidad y el desplazamiento, que representan la contribución del movimiento del suelo a altas, medias y bajas frecuencias, respectivamente.
- *Intensidad macrosísmica*: parámetro que mide, de forma cualitativa, la severidad de la sacudida de un terremoto a partir de los efectos observados, en un lugar determinado, sobre las personas, los edificios y el terreno. Se trata de la medida más antigua del tamaño de un terremoto, que sigue reconociéndose en la actualidad como un indicador de los daños producidos tras un terremoto (Giovinazzi, 2005).
- *Periodo de retorno*: intervalo de tiempo en que se espera que el parámetro del movimiento estudiado alcance un nivel de referencia dado con una probabilidad del 64%. Debe diferenciarse del periodo transcurrido para que un terremoto alcance ese nivel del parámetro del movimiento del suelo. Por ejemplo, si en un emplazamiento se obtiene una intensidad VIII con un periodo de retorno de 500

años, se deduce que hay una probabilidad del 64% de que en 500 años ocurra un movimiento sísmico de intensidad VIII, pero no significa que se repita un sismo de intensidad VIII cada 500 años. El periodo de retorno se elige en función del tiempo de vida útil del edificio y su importancia. En los edificios ordinarios se suele emplear un periodo de 500 años, indicando que existe un 10% de probabilidad de excedencia del parámetro del movimiento (PGA, intensidad, etc.), en 50 años, tiempo de vida útil que se suele atribuir a estos edificios. Para edificios más importantes, tales como centrales nucleares, se recurre a periodos de retorno mayores, de 10.000 años o más (Muñoz, 1989; Benito y Cabañas, 1999; Benito y Jiménez, 1999).

- *Función de transferencia del suelo:* función que describe la relación entre dos movimientos en el dominio frecuencial. En este trabajo, salvo que se indique lo contrario, la función de transferencia será la relación del movimiento entre el basamento rocoso y el suelo en superficie de una misma columna de suelo.
- *Espectro de respuesta:* máxima respuesta de osciladores simples de un grado de libertad, con cierto amortiguamiento, ante una excitación sísmica, en función de la frecuencia propia del oscilador. Esta respuesta puede expresarse en términos de aceleración, velocidad o desplazamiento.
- *Suelos blandos:* a lo largo de este trabajo, este término denotará aquellos suelos con una baja compactación y una velocidad de cizalla inferior a 750m/s.
- *Suelos duros:* en el presente trabajo, este término denotará aquellos suelos con una alta compactación y una velocidad de cizalla superior a 750m/s.
- *Intensidad de Arias:* parámetro que evalúa el daño potencial sobre un emplazamiento. Su objetivo es obtener una medida sencilla de la intensidad macrosísmica basada en la capacidad de daño de un sismo, sin considerar las características de las estructuras, a partir de los valores de aceleración registrados en el emplazamiento de estudio. Aunque la PGA se suele utilizar en los estudios de peligrosidad, resulta ser un pobre estimador del daño potencial sobre un emplazamiento en comparación con otros parámetros tales como la intensidad de Arias, que muestra una buena correlación con la información macrosísmica (Cabañas *et al.*, 1997; Ramírez *et al.*, 2008).

### 3.1.2. Conceptos básicos sobre la peligrosidad sísmica a escala regional

La peligrosidad sísmica se define como la probabilidad de que cierto parámetro del movimiento del suelo sea excedido en cierto emplazamiento y durante cierto periodo de tiempo. Los parámetros del movimiento del suelo que se suelen utilizar en los estudios de peligrosidad son, o bien los valores pico del desplazamiento (PGD, *Peak Ground Displacement*), la velocidad (PGV, *Peak Ground Velocity*), o la aceleración (PGA, *Peak Ground Acceleration*), o bien la intensidad macrosísmica.

Existen dos métodos de evaluación de la peligrosidad sísmica a escala regional: los deterministas y los probabilistas.

Los métodos deterministas parten de la hipótesis de que la sismicidad en una región es estacionaria, es decir, que los terremotos se producirán en el futuro de la misma forma en que lo hicieron en el pasado. La metodología consiste en evaluar los mayores sismos producidos en la región y estimar los valores máximos de los parámetros del movimiento. Por ejemplo, si en un emplazamiento se estima un valor de intensidad máxima de VIII, el resultado del estudio de peligrosidad sería que la mayor intensidad que se sentirá en ese lugar como consecuencia de cualquier terremoto que suceda en el área circundante será de VIII.

Los métodos probabilistas, por el contrario, analizan la sismicidad de la zona y establecen leyes de recurrencia para el futuro, obteniendo funciones de probabilidad de los parámetros de movimiento del suelo. A cada una de estas funciones de probabilidad se les asocia una probabilidad anual de excedencia, o su inverso, el periodo de retorno.

Los resultados finales de los estudios de peligrosidad a nivel probabilista suelen ser mapas de peligrosidad, donde se reflejan los parámetros del movimiento (PGA, intensidad, etc.), para cada región con un periodo de retorno determinado. Así es como aparece en la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02), o en los planes de emergencia de Protección Civil (Dirección General de Protección Civil, 1995; Benito *et al.*, 2006).

En los estudios de peligrosidad se estudian los tres factores que intervienen en el movimiento producido en un emplazamiento dado: la fuente, la propagación y el efecto local del suelo. El primer factor estudia la distribución espacial y temporal de la energía de radiación emitida durante un terremoto. Esta energía se propaga en forma de ondas sísmicas a través de la Tierra, que se ven afectadas por las diferentes propiedades mecánicas del medio, produciéndose fenómenos de reflexión, refracción y difracción. Por último, cuando estas ondas se propagan cerca de la superficie, sus propiedades temporales y espectrales pueden variar de forma significativa, y con grandes diferencias entre una región y otra, en función de las condiciones locales de cada una de ellas (Luzón *et al.*, 2002). El estudio de la fuente implica la determinación de los parámetros focales que definen el proceso de ruptura, es decir, el mecanismo focal del terremoto, que debe tener en cuenta la sismicidad de la región, las fallas activas y las zonas sismogénicas, las dimensiones de fractura, los estados de esfuerzos, etc.

El segundo factor que influye en el movimiento del suelo es la propagación de las ondas a través del medio, desde el foco al emplazamiento. Su estudio se basa en el hecho de que la energía de las ondas se atenúa durante su trayectoria debido principalmente al efecto de la expansión geométrica del frente de ondas y a la anelasticidad del medio. Este factor se analiza a través de leyes de atenuación (generalmente de intensidad), que se obtienen experimentalmente, de tal forma que, dado cierto movimiento generado en la región, se puede determinar el movimiento esperado en un emplazamiento a cierta distancia de la fuente.

El tercer factor son los efectos locales del suelo, que se describen en el siguiente apartado. Si sólo se tienen en cuenta los factores de la fuente y la propagación del medio, el movimiento del suelo queda caracterizado para un emplazamiento en roca o suelo duro. Sin embargo, cuando el emplazamiento se encuentra sobre suelos blandos, con cierto espesor de sedimentos, o presenta cierta topografía, deben tenerse en cuenta los efectos locales del suelo (o efecto de sitio).

### 3.1.3. Peligrosidad sísmica a escala local

La peligrosidad sísmica a escala local se define como la variación de la señal sísmica entre dos puntos próximos debida a la geología del terreno, caracterizado por su geometría y sus propiedades dinámicas (velocidades de las ondas P y S, densidad, amortiguamiento, etc.) (Cid, 1998).

La influencia de las condiciones locales del suelo, en especial la geología superficial y la topografía, puede ser muy importante a la hora de estudiar el movimiento del suelo en un emplazamiento, pudiendo llegar a multiplicar por un factor 5 la aceleración pico registrada en roca, o incluso aumentar la intensidad macrosísmica en 3 grados, lo que puede dar lugar a graves daños sobre los edificios que se encuentren en dichos emplazamientos en caso de ocurrir un terremoto (Benito y Jiménez, 1999). Los efectos locales no sólo pueden producir amplificaciones (o deamplificaciones), del movimiento del suelo, sino que también afectan al contenido frecuencial que llega a un emplazamiento, y pueden variar parámetros tales como la duración del movimiento o las amplitudes máximas, así como dar lugar a comportamientos no lineales del suelo (Aki, 1993; Dimitriu *et al.*, 1998). De esta forma, el movimiento del suelo puede llegar a ser muy distinto en dos emplazamientos muy próximos entre sí, y por tanto un sismo se sentirá con una intensidad distinta según las condiciones locales del suelo. Si en el lugar de estudio se han producido terremotos en el pasado, el análisis de la distribución de los daños y los distintos grados de intensidad asignados puede servir como una guía para demostrar la existencia de efectos locales en ese emplazamiento (Bard *et al.*, 1995; Álvarez, 1999).

En cuanto a la influencia de la geología superficial, es conocido el hecho de que las estructuras sobre suelos blandos presentan mayores daños que las situadas sobre roca aflorante (Cid, 1998). Éste puede ser el caso de ciudades cercanas al mar o a ríos, o situadas en zonas montañosas, donde existen regiones con grandes espesores de suelos sedimentarios blandos, y se producen altas amplificaciones (Le Brun *et al.*, 2001). La importancia de los suelos blandos en este tipo de estudios es tal que incluso algunos autores afirman que, en emplazamientos sobre suelos blandos, los efectos locales tienen más importancia que cualquier efecto relacionado con la fuente, incluso en condiciones de campo próximo (Lermo y Chávez-García, 1993).

En general, hay dos formaciones que pueden producir muy altas amplificaciones del suelo, con efectos catastróficos en caso de producirse un sismo (Bard *et al.*, 1995):

- Formaciones no muy rígidas sobre un sustrato rígido, tales como en el caso de cuencas sedimentarias o valles aluviales. Las altas amplificaciones se deben a los contrastes verticales de rigidez.
- Zonas de contacto, donde existen discontinuidades laterales de la rigidez del suelo. El caso más típico es el de una falla vertical o casi vertical (con un ángulo de buzamiento alto) con un suelo no muy rígido a un lado y una formación más antigua en el otro.

Por otro lado, la topografía produce amplificación del movimiento en las cimas de las montañas (sobre topografías convexas), y deamplificación en el fondo de los valles (sobre topografías cóncavas), siendo mayor el efecto para las ondas S que para las ondas P, y siendo asimismo mucho mayor la amplificación sobre las componentes horizontales del movimiento que sobre las verticales. Por otro lado, a mayor pendiente, mayor será la amplificación del suelo. Estos efectos dependen del contenido frecuencial de la onda incidente, obteniéndose amplificaciones máximas cuando las longitudes de onda incidente son del orden de las dimensiones horizontales de la topografía (Bard, 1985; Álvarez, 1999).

El rango de frecuencias de interés en ingeniería sísmica varía entre 0.1Hz y 20Hz. Dado que las velocidades de propagación de las ondas sísmicas cerca de la superficie varían entre 200m/s y 2000m/s, las longitudes de onda asociadas a estas ondas varían de 10m a unos 20km. Por tanto, las estructuras geológicas (como cuencas sedimentarias o montañas), de estas dimensiones son las que producirán efectos locales significativos en un emplazamiento, debiendo prestar especial atención a los efectos producidos en estructuras tales como puentes, presas, edificios de interés socio-cultural, etc. (Luzón *et al.*, 2002).

Las frecuencias que más influyen en el movimiento del suelo, en cierto emplazamiento, dependen del tipo de suelo y la distancia epicentral del mismo. Los suelos blandos tienen una baja frecuencia propia y tienden a amplificar las frecuencias bajas, mientras que la roca amplifica las altas frecuencias. Por otro lado, a mayor distancia al epicentro, menor contenido frecuencial, y mayor pérdida de las altas

frecuencias. Si hay edificios sobre dicho emplazamiento, debe añadirse el factor de la frecuencia predominante del edificio, relacionada con la altura del mismo (a mayor altura, menor frecuencia predominante). Los mayores daños se producirán cuando ésta sea del mismo orden que la frecuencia predominante del movimiento (en roca), y la frecuencia natural del suelo en el emplazamiento, tal y como sucedió en el terremoto de México de 1985 (Singh *et al.*, 1988; Benito y Cabañas, 1999; Luzón *et al.*, 2002). Combinando todos estos factores, se puede concluir que los mayores daños se obtienen en edificios bajos sobre suelos duros en campo próximo (donde predominan las altas frecuencias), y en edificios altos sobre suelos blandos en campo lejano, con predominio de bajas frecuencias (figura 3.1, Benito y Cabañas, 1999).

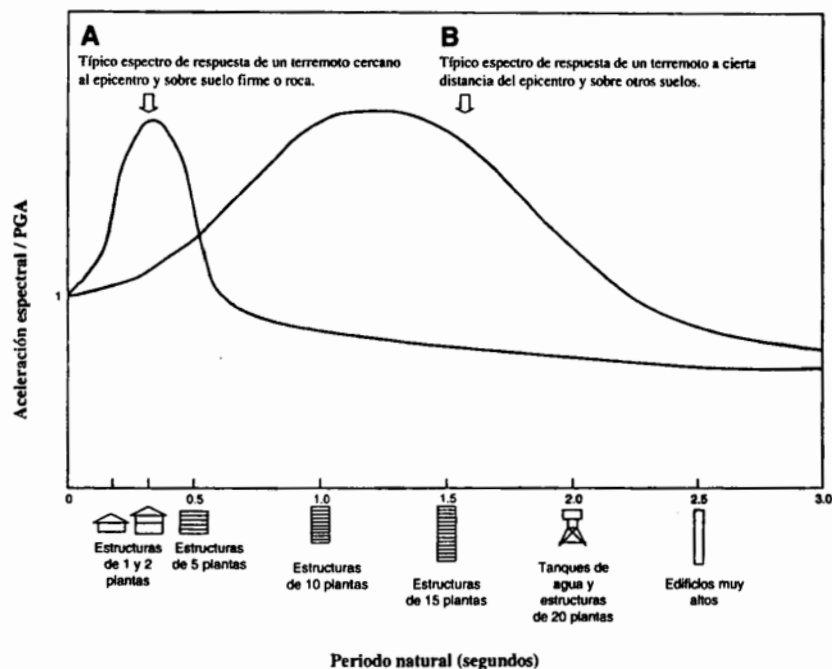


Figura 3.1. Espectros de respuesta en función del tipo de suelo, la distancia al epicentro y el tipo de edificios (Benito y Cabañas, 1999).

El análisis de los efectos locales del movimiento suelen dar lugar a estudios de microzonación sísmica, en los que se identifican zonas homogéneas en cuanto a las frecuencias fundamentales y las amplificaciones del suelo, obteniéndose mapas donde se distinguen las regiones con distintos comportamientos sísmicos, en función del tipo de suelo, la topografía del terreno, etc. Es importante hacer notar que las normas sismorresistentes a escala nacional no tienen en cuenta los efectos locales ni los efectos



inducidos por los sismos. Esta información, que requiere de estudios específicos a escala local, puede obtenerse de los análisis de microzonación sísmica.

Existen tres niveles de estudios de microzonación sísmica, en orden creciente de precisión y complejidad (Bard *et al.*, 1995):

- Nivel A, donde se obtienen mapas de microzonación sísmica a partir de la información geológica de la región, señalándose los coeficientes de amplificación del suelo por efectos topográficos.
- Nivel B, en el que se precisa de información de las características geométricas (espesores de las capas), y mecánicas (densidades, velocidades de cizalla), de las formaciones geológicas cercanas a la superficie. De esta forma, se generan mapas de microzonación en los que se indican las frecuencias fundamentales y las amplificaciones del suelo.
- Nivel C, donde a la información del nivel B se le añade la obtenida en campañas de campo (medidas de ruido sísmico, sondeos geotécnicos), y análisis numéricos y experimentales. De esta forma, los parámetros mecánicos del suelo serán medidos en lugar de estimados, y los mapas de frecuencias fundamentales y amplificaciones del suelo no sólo se derivan de métodos simplificados, sino que vienen respaldados por estudios experimentales y/o numéricos. De esta forma es posible obtener información fiable sobre los efectos locales en un emplazamiento. Estos resultados servirán para generar y mejorar las futuras normas sismorresistentes que se realicen en la zona de estudio.

En el análisis del riesgo sísmico de la ciudad de Málaga se ha aplicado el nivel C de estudio de la microzonación sísmica.

Por otro lado, los efectos locales del suelo pueden estudiarse a partir de (Álvarez, 1999; Macau, 2008):

- Métodos experimentales (o de *aproximación instrumental*): en ellos se utilizan datos registrados en el propio emplazamiento. Su principal objetivo

es la obtención de las funciones de transferencia de las capas superficiales del suelo a partir de registros de terremotos o de ruido sísmico.

- Métodos numéricos (o de *aproximación teórica*): se trata básicamente de simulaciones numéricas a partir de modelos que se aproximen lo mejor posible a la situación real, para lo cual necesitan disponer de información geológica y geotécnica de la zona de análisis.

En el presente estudio se han aplicado ambas metodologías, que se describen a continuación.

### 3.1.3.1. Método del cociente espectral H/V

El método del cociente espectral H/V (Nakamura, 1989), consiste en la obtención de las frecuencias fundamentales y amplificaciones del suelo a partir del cociente entre los espectros de Fourier de las componentes horizontal y vertical de registros de sismos o de ruido sísmico, tomados en una misma estación. Se trata de una técnica ampliamente utilizada en los estudios de efectos sísmicos locales, debido básicamente a su sencillez, fiabilidad, bajo coste y rapidez en la obtención de resultados.

El método se popularizó entre la comunidad internacional tras la publicación de la técnica por Nakamura (1989), por lo que a menudo se lo conoce como “método de Nakamura”. Sin embargo, la metodología fue propuesta mucho antes en Japón, en trabajos como el de Suzuki (1933), y Nogoshi e Igarashi (1971a y 1971b) (Le Brun *et al.*, 2001; Fäh, 2006; Haghshenas *et al.*, 2008).

Aunque puede utilizarse con buenos resultados a partir de registros sísmicos (Lermo y Chávez-García, 1993), esta técnica se utiliza básicamente con medidas de ruido sísmico, tanto en zonas urbanas como rurales. Las ondas asociadas al ruido sísmico (*microtremors*), se deben a vibraciones ambientales del suelo excitadas por perturbaciones naturales o artificiales tales como el viento, la lluvia, el oleaje, el paso de los trenes, el tráfico, efectos debidos a la industria tales como las vibraciones de máquinas, etc. Estas perturbaciones constituyen una mezcla de ondas internas y

superficiales, y pueden medirse mediante sismómetros de alta sensibilidad. El ruido sísmico constituye una herramienta muy útil para estimar los efectos de la geología superficial en el movimiento sísmico sin la necesidad de disponer de información geológica adicional. Su estudio es especialmente importante en las zonas de baja o moderada sismicidad, donde no se dispone de registros de movimientos fuertes del suelo (o *strong-motion*) (Lachet y Bard, 1994; Nakamura, 2000; Fäh, 2006).

La técnica del cociente espectral H/V parte de una serie de hipótesis (Nakamura, 1989):

- a) Las ondas asociadas al ruido sísmico están formadas por diferentes tipos de ondas, tanto internas como superficiales.
- b) La amplificación de las componentes horizontales del movimiento se asocia a las ondas S, y la de la componente vertical a las ondas P.
- c) En el basamento, la amplificación de las componentes horizontales y la vertical es la misma (*la roca no amplifica más una componente que otra*).
- d) Se considera la amplificación de las ondas S, pero no la de las ondas P.

La técnica se basa, en primera instancia, en la hipótesis de que la componente vertical contiene más información de la fuente del movimiento sísmico que las componentes horizontales.

Se define la función de transferencia  $S_T$  de las capas superficiales como:

$$S_T = \frac{H_S(\omega)}{H_B(\omega)} \quad (3.1)$$

donde  $H_S(\omega)$  y  $H_B(\omega)$  son, respectivamente, los espectros de amplitud de Fourier de las componentes horizontales del ruido sísmico en superficie y en el basamento rocoso.

El factor  $H_S(\omega)$  contiene el efecto de las ondas superficiales. Como el ruido sísmico se propaga mayoritariamente como ondas Rayleigh,  $H_S(\omega)$  podría verse afectado por las ondas Rayleigh. El efecto de las ondas de Rayleigh debería incluirse en

la componente vertical del espectro de Fourier en superficie,  $V_S(\omega)$ , pero no en la componente vertical en el basamento,  $V_B(\omega)$ . Suponiendo que el movimiento vertical no se amplifica en las capas superficiales del suelo, se define el parámetro  $E_S$ , que representa el efecto de las ondas Rayleigh en el movimiento vertical, del siguiente modo:

$$E_S = \frac{V_S(\omega)}{V_B(\omega)} \quad (3.2)$$

Se obtendría  $E_S=1$  si no hubiera influencia de las ondas de Rayleigh, aumentando su valor por encima de la unidad a medida que aumenta su influencia.

Suponiendo que las ondas Rayleigh afectan por igual a las componentes horizontales y verticales del movimiento, se define una nueva función de transferencia  $S_{TT}$  más fiable, donde se ha eliminado el efecto de las ondas de Rayleigh:

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_S} = \frac{\frac{H_S(\omega)}{V_S(\omega)}}{\frac{H_B(\omega)}{V_B(\omega)}} \quad (3.3)$$

Esta expresión se puede describir de la forma:

$$S_{TT} = \frac{R_S}{R_B} = \frac{\frac{H_S(\omega)}{V_S(\omega)}}{\frac{H_B(\omega)}{V_B(\omega)}} \quad (3.4)$$

donde  $R_S$  y  $R_B$  se obtienen realizando el cociente entre las componentes horizontal y vertical de los espectros en superficie y en el basamento, respectivamente.

Una de las hipótesis de este método es que el basamento rocoso amplifica por igual las componentes horizontales y verticales del suelo (Nakamura, 1989). Por tanto se tiene:

$$R_B = \frac{H_B(\omega)}{V_B(\omega)} \approx 1 \Rightarrow S_{TT} = R_S = \frac{H_S(\omega)}{V_S(\omega)} \quad (3.5)$$

Por tanto, se puede estimar la función de transferencia de las capas superficiales del suelo a partir de las medidas de ruido sísmico realizadas solamente en superficie, sin necesidad de realizar medidas sobre el basamento rocoso. Un ejemplo del resultado de esta técnica puede verse en la figura 3.2.

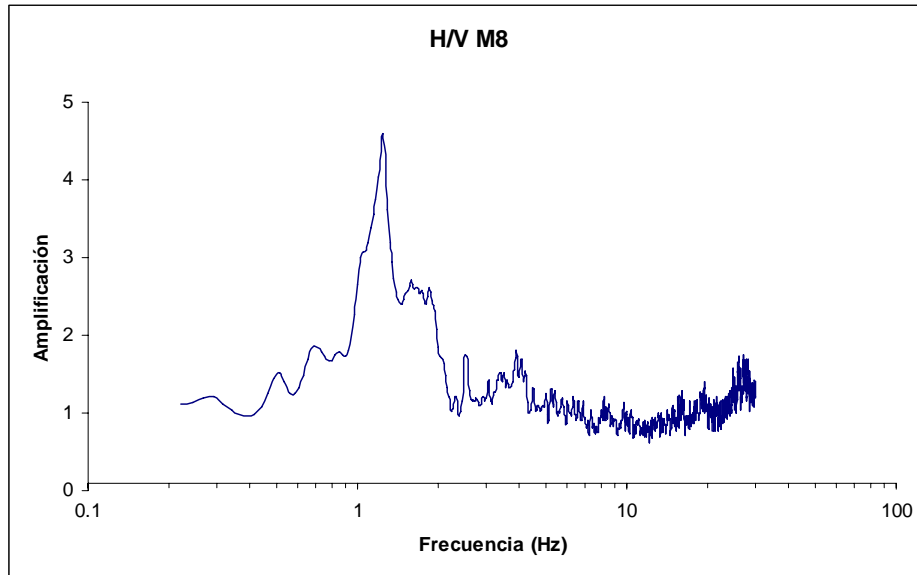


Figura 3.2. Cociente espectral H/V obtenido a partir de la técnica de Nakamura para suelo blando.

Para poder aplicar el método de Nakamura, es necesario que la superficie del suelo esté compuesta por una capa de material blando sobre un semi-espacio o una capa más rígida. Este contraste de rigidez es esencial para que haya resonancia, lo que hace que el método del cociente H/V sea apropiado para el estudio de los suelos blandos, ya que éstos presentan grandes contrastes mecánicos con las capas subyacentes (o grandes diferencias en las velocidades de las ondas de cizalla), y por tanto se obtienen efectos de resonancia claramente identificables. De esta forma, el cociente espectral entre las componentes horizontales y verticales del movimiento presentarán un pico de máxima amplitud para la frecuencia de resonancia (o frecuencia fundamental) del suelo (Delgado *et al.*, 2000; Fäh, 2006).

Esta técnica da muy buenas estimaciones de la frecuencia de resonancia del suelo en emplazamientos de geología sencilla, compuestos por una superposición de capas sedimentarias horizontales (tales como cuencas sedimentarias), así como para

regiones con topografía. Asimismo, permite conocer la morfología del basamento en las zonas donde se carece de esta información, pues con este método se puede obtener de forma rápida una idea general de la estructura bajo la superficie (Lermo y Chávez-García, 1993; Lachet y Bard, 1994; Ibs-von Seht y Wohlenberg, 1999).

La amplitud correspondiente a la frecuencia fundamental indica el contraste entre las velocidades de cizalla del basamento y la capa sedimentaria, y proporciona información sobre los posibles efectos de resonancia producidos durante un terremoto. A mayor amplitud, mayor contraste de velocidades. Sin embargo, la amplitud del cociente  $H/V$  no sólo depende del contraste de velocidades  $V_s$ , sino también de la distancia y la profundidad de la fuente. Por ello, las amplitudes  $H/V$  sólo indican cualitativamente los posibles efectos resonantes (Fäh, 2006).

Numerosos estudios avalan la fiabilidad de los resultados de esta técnica en cuanto a los valores de las frecuencias fundamentales del suelo. Sin embargo, la amplitud del cociente  $H/V$  no puede asociarse a las amplificaciones del suelo de forma fiable, lo que ha sido ya constatado en numerosas publicaciones, tanto estudios teóricos como experimentales (Lachet y Bard, 1994; Lermo y Chávez-García, 1994; Cid, 1998; Dimitriu *et al.*, 1998; Goula *et al.*, 1998; Ibs-von Seht y Wohlenberg, 1999; Le Brun *et al.*, 2001; Coral, 2002, y Haghshenas *et al.*, 2008, por citar algunos). Además, esta metodología sólo proporciona el valor de una sola frecuencia fundamental, correspondiente al primer modo de resonancia, sin obtenerse información alguna de los demás modos. Otra limitación de esta técnica es que no ofrece información a frecuencias muy bajas ( $f < 0.5\text{Hz}$ ), correspondientes a estructuras sedimentarias de gran espesor (Lermo y Chávez-García, 1993; Lachet y Bard, 1994; Goula *et al.*, 1998). Por ello, suele recomendarse que los estudios de microzonación no estén solamente basados en el método de Nakamura, sino que los resultados se comparen con los obtenidos mediante otras técnicas de estudio de efecto de sitio, por ejemplo los métodos numéricos (Cid *et al.*, 2001).

Debe aclararse que el método del cociente espectral  $H/V$  no es la única técnica experimental para obtener las frecuencias fundamentales del suelo. Existe un método clásico de obtención de las razones espectrales suelo-roca (o método SSR, *Standard Spectral Ratio method*), que consiste en tomar registros de sismos o ruido sísmico simultáneamente en el emplazamiento de estudio en suelo y en un emplazamiento de

referencia en roca y compararlos entre sí. Este método se considera el más fiable para la estimación del efecto de sitio. Sin embargo, no es sencillo de utilizar en zonas urbanas, debido a los costes elevados en la instrumentación, el alto nivel de ruido, la larga duración de los experimentos (que puede ser de varios meses), etc. La técnica de Nakamura, por otro lado, es un buen método para evaluar las frecuencias de resonancia del suelo en zonas urbanas (que pueden variar mucho en distancias cortas), al ser un método rápido y sencillo que necesita solamente de una estación con tres componentes para registrar el ruido sísmico (Lachet y Bard, 1994; Le Brun *et al.*, 2001; Haghshenas *et al.*, 2008).

Recientemente se han publicado los resultados del proyecto SESAME (*Site EffectS assessment using AMbiental Excitations*), llevado a cabo por varios equipos europeos entre 2001 y 2004, y cuyo objetivo era estudiar detenidamente la fiabilidad del método del cociente espectral H/V desde el punto de vista instrumental, numérico y teórico. La conclusión final del proyecto SESAME es que las medidas de ruido sísmico, siempre que se realicen, procesen y analicen con precaución, pueden aportar información útil, tanto cuantitativa como cualitativa (aunque limitada), sobre los efectos de amplificación y las condiciones del suelo. Su estudio se recomienda como una herramienta rápida y de bajo coste para estudios de efecto de sitio o microzonación (Bard, 2008; Chatelain *et al.*, 2008; Haghshenas *et al.*, 2008; Theodoulidis *et al.*, 2008).

En este trabajo se ha aplicado la técnica del cociente espectral H/V siguiendo una metodología similar a la de otros trabajos dentro del proyecto ERSE (Macau, 2008), con el objetivo de obtener las frecuencias fundamentales del suelo. Las principales etapas son:

- 1.- Realización de una campaña de medidas de ruido sísmico en la ciudad de Málaga.
- 2.- Obtención de las razones espectrales mediante dos programas en *Fortran* 77 desarrollados por el Institut Geològic de Catalunya:
  - *city.for*: cambia el formato de los datos y los adapta al formato de entrada de *nakamur.for*.

- *nakamur.for*: realiza un suavizado de la señal dividiendo el registro en ventanas que se superponen un 25%, y calcula tres parámetros de salida, que corresponden a los cocientes espectrales de las componentes este-oeste  $\left( \frac{H_{E,S}(\omega)}{V_S(\omega)} \right)$ , norte-sur  $\left( \frac{H_{N,S}(\omega)}{V_S(\omega)} \right)$  y horizontal  $\left( \frac{H_S(\omega)}{V_S(\omega)} \right)$ , con respecto a la componente vertical de la señal. Este último cociente es el que se utilizará para obtener la función de transferencia del suelo, donde se tiene:

$$S_{TT} = \frac{H_S(\omega)}{V_S(\omega)} = \frac{H_{E,S}(\omega) + H_{N,S}(\omega)}{2V_S(\omega)} \quad (3.6)$$

3.- Obtención de la frecuencia fundamental del suelo a partir de la representación del cociente H/V frente a la frecuencia para el rango de frecuencias de interés en ingeniería sísmica (en este estudio se ha utilizado el rango entre 0.2 y 30Hz), y hallando el pico correspondiente a la máxima amplificación.

Una vez obtenidas las frecuencias fundamentales del suelo mediante esta técnica, se aplicará un método numérico para calcular las funciones de transferencia del suelo, y con ello las amplificaciones del mismo. El método numérico aplicado se describe a continuación.

### 3.1.3.2. Simulación numérica 1D. Método lineal equivalente

Cuando no es posible aplicar métodos experimentales de efectos sísmicos locales en un emplazamiento, en especial en regiones de sismicidad moderada, se suele recurrir a los métodos numéricos. En ellos, a partir de un acelerograma en roca y los parámetros característicos de las distintas columnas de suelo, se obtienen las funciones de transferencia entre dos capas cualesquiera de dicha columna, así como la amplificación del suelo en términos de intensidad.

Los métodos numéricos se han convertido en una importante herramienta para analizar los efectos locales del suelo, en especial porque sirven para simular el



movimiento del suelo durante la ocurrencia de un terremoto con unas características determinadas, y porque se pueden realizar estudios de la influencia de los distintos parámetros involucrados (frecuencia fundamental, amplificación, espectro de respuesta, etc.), sobre emplazamientos de topografía irregular, cuencas sedimentarias, etc.

Para aplicar los métodos numéricos de estudios de efectos locales, es necesario:

- a) Un modelo matemático que represente el fenómeno sísmico con sus efectos de fuente y propagación a través del medio.
- b) Definir una serie de parámetros geológicos y geotécnicos del emplazamiento a estudiar.

En este estudio se ha utilizado el programa *ProShake* (versión 1.1; ProShake, 2000), como técnica numérica de estudio de los efectos locales del suelo. Se trata de un método 1D lineal equivalente que calcula la respuesta asociada a la propagación vertical de las ondas de cizalla a través de un sistema viscoelástico lineal. Para ello utiliza un medio unidimensional semi-infinito estratificado en capas planas horizontales, homogéneas y viscoelásticas. Se basa en la solución continua de la ecuación de ondas sísmicas en el dominio frecuencial, a través de la transformada de Fourier. Para tener en cuenta la no linealidad del comportamiento del suelo, se realiza una aproximación lineal, mediante un proceso iterativo de ajuste del módulo de cizalla y el factor de amortiguamiento de cada capa, hasta que éstos sean consistentes con los niveles de esfuerzos y deformaciones efectivos inducidos en el suelo (ProShake, 2000; Coral, 2002; Macau, 2008).

Básicamente, el método se basa en las siguientes hipótesis (Coral, 2002):

- a) Excitación armónica: las ondas vienen dadas en forma discreta por valores de aceleración equiespaciados por un intervalo temporal de muestreo.
- b) Propagación vertical (en dirección  $z$ ), considerando sólo las ondas de cizalla. Además, se considera que las ondas solamente provienen de la formación rocosa subyacente.

- c) Medio isótropo y homogéneo formado por capas planas, horizontales y paralelas, sobre un semiespacio de profundidad infinita, donde la única variable espacial es la profundidad. Las capas están caracterizadas por su espesor ( $h$ ), densidad ( $\rho$ ), velocidad de las ondas de cizalla ( $V_s$ ), módulo de cizalla ( $G$ ), y factor de amortiguamiento ( $\beta$ ).

El programa *ProShake* es una versión optimizada de *SHAKE* (Schnabel *et al.*, 1972), que estudia la respuesta debida a la propagación vertical de las ondas de cizalla a través de un medio viscoelástico lineal (figura 3.3). En este trabajo se explicarán los principios básicos en que se basa esta metodología. Un estudio más detallado acerca del esquema del programa *ProShake* y su funcionamiento puede encontrarse en Coral (2002).

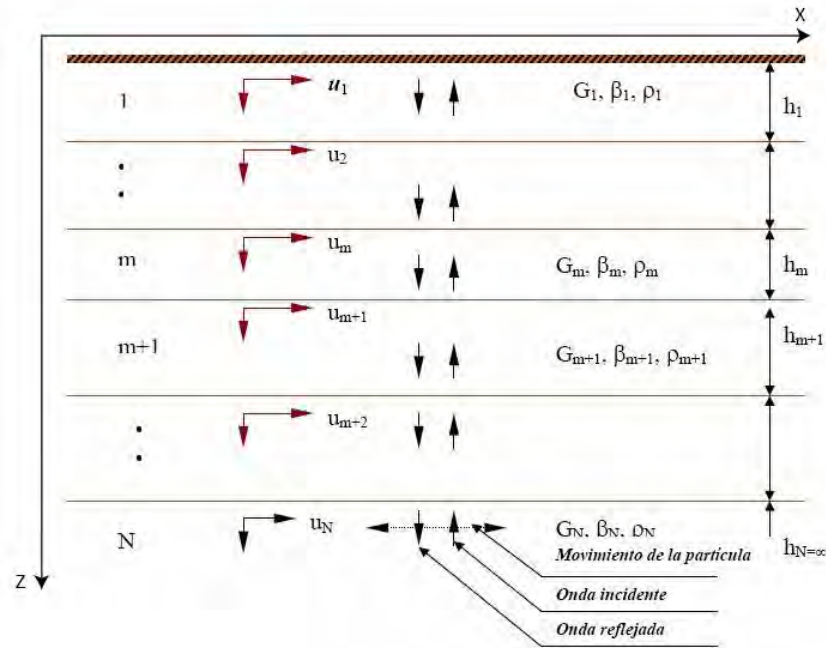


Figura 3.3. Esquema de la propagación vertical de las ondas de cizalla a través de un medio unidimensional semi-infinito estratificado en capas planas (modificado a partir de Coral, 2002).

El problema a resolver es la ecuación del movimiento dada por la segunda ley de Newton:

$$\int_V F_i dV + \int_S T_i dS = \frac{d}{dt} \int_V \rho v_i dV \quad (3.7)$$

donde  $F$  son las fuerzas del volumen  $V$ ,  $T$  los esfuerzos que actúan sobre la superficie  $S$  y  $v$  la velocidad en cada punto del volumen.

En este problema se suponen nulas las fuerzas de volumen. Las ondas de cizalla, a través de los esfuerzos de cizalla ( $\tau$ ), producen una deformación  $\gamma$  sobre las partículas del suelo, generando movimientos horizontales armónicos. Así, el movimiento de las partículas del suelo depende de dos variables, una variable espacial  $z$  (la profundidad) y la variable temporal  $t$ . De esta forma, la propagación vertical de las ondas de cizalla en el sistema de la figura 3.3 produce unos desplazamientos horizontales  $u(z,t)$  de las partículas del suelo que satisfacen la ecuación de ondas amortiguada:

$$\rho \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 u(z,t)}{\partial z^2} + \eta \frac{\partial^3 u(z,t)}{\partial x^2 \partial t} \quad (3.8)$$

donde  $\rho$  es la densidad,  $G$  el módulo de cizalla y  $\eta$  el coeficiente de viscosidad. En esta expresión, el primer término de la derecha tiene en cuenta la rigidez y el segundo el amortiguamiento del medio.

Definiendo los desplazamientos armónicos  $u(z,t)$  en forma compleja como:

$$u(z,t) = U(z) e^{i\omega t} \quad (3.9)$$

Si se sustituye la expresión 3.9 en la 3.8, se obtiene:

$$\rho \omega^2 U(z) = (G + i\omega\eta) \frac{\partial^2 U(z)}{\partial z^2} \quad (3.10)$$

cuya solución general se puede expresar así:

$$U(z) = E e^{ikz} + F e^{-ikz} \quad (3.11)$$

donde  $k$  es el número de onda  $\left( k^2 = \rho \frac{\omega^2}{G^*} \right)$ , siendo  $G^*$  el módulo de cizalla complejo  $(G^* = G + i\omega\eta)$ .

La solución de la ecuación de ondas para un movimiento armónico de frecuencia  $\omega$  se puede expresar así:

$$u(z,t) = Ee^{i(kz+\omega t)} + Fe^{-i(kz-\omega t)} \quad (3.12)$$

donde el primer término representa la onda incidente propagándose en sentido ascendente, y el segundo la onda reflejada con propagación en sentido descendente.

Por otro lado, el factor de amortiguamiento  $\beta$  se relaciona con el coeficiente de viscosidad  $\eta$  a través de la expresión:

$$2G\beta = \omega\eta \quad (3.13)$$

Diversos experimentos han demostrado que el factor de amortiguamiento  $\beta$  y el módulo de cizalla  $G$  son prácticamente constantes en el rango de frecuencias que se va a utilizar. Por ello, conviene expresar el módulo de cizalla complejo  $G^*$  en términos del factor de amortiguamiento  $\beta$  y no de la viscosidad  $\eta$ . Utilizando la expresión 3.13 se tiene:

$$G^* = G + i\omega\eta = G(1 + 2i\beta) \quad (3.14)$$

Con todos estos resultados, se define el esfuerzo de cizalla  $\tau$ , la deformación  $\gamma$  y la aceleración del suelo  $\ddot{u}$  en función de la profundidad  $z$  y el tiempo  $t$  del siguiente modo:

$$\tau(z,t) = G\gamma = G^* \frac{\partial u}{\partial t} = ikG^* (Ee^{ikz} - Fe^{-ikz})e^{-i\omega t} \quad (3.15)$$

$$\gamma(z,t) = \frac{\partial u}{\partial z} = ik(Ee^{i(kz+\omega t)} - Fe^{-i(kz-\omega t)}) \quad (3.16)$$

$$\ddot{u}(z,t) = \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\omega^2 (Ee^{i(kz+\omega t)} - Fe^{-i(kz-\omega t)}) \quad (3.17)$$

Estas ecuaciones son las que se aplicarán a cada una de las capas del suelo una vez introducido un sistema de coordenadas locales en cada capa. Los valores en las fronteras entre cada capa se calcularán teniendo en cuenta las siguientes condiciones de contorno:

- Esfuerzos de cizalla nulos en la superficie:  $\tau(z=0)=0$
- Continuidad de los esfuerzos y las deformaciones en las interfaces entre todas las demás capas.
- En la primera capa se cumple  $E_1=F_1$

La capa m del perfil de suelo estará relacionada con la capa 1 de la forma:

$$E_m = e_m(\omega)E_1 \quad ; \quad F_m = f_m(\omega)F_1 = f_m(\omega)E_1 \quad (3.18)$$

donde  $e_m$  y  $f_m$  son las funciones de transferencia entre las capas 1 y m.

La función de transferencia entre dos capas m y n cualesquiera se define así:

$$A_{m,n}(\omega) = \frac{u_m(z,t)}{u_n(z,t)} = \frac{e_m(\omega) + f_m(\omega)}{e_n(\omega) + f_n(\omega)} \quad (3.19)$$

De esta forma se obtendrían las amplificaciones producidas en la superficie de la capa m dado un movimiento que llega a la base de la capa n. Por lo general, cuanto más cerca de la superficie se esté, mayores amplitudes se obtendrán.

Todo lo expresado hasta ahora describe la resolución del problema teniendo en cuenta el carácter disipativo del medio, pero no su no-linealidad. Para incluir este factor, se utiliza un método iterativo que ajusta los módulos de cizalla G y los factores de amortiguamiento  $\beta$  de cada capa al nivel de deformación medio inducido en la misma durante la excitación sísmica.

Por otro lado, toda la formulación planteada hasta ahora parte de la hipótesis de que la función de excitación que se introduce es armónica y continua. Sin embargo, los registros de aceleración suelen ser funciones no armónicas formadas por valores discretos con un intervalo de muestreo  $\Delta t$ . Por tanto, los desplazamientos pueden expresarse de la forma:

$$u(k\Delta t) = \sum_{j=0}^{n/2} \left( a_j e^{i\omega_j t} + b_j e^{-i\omega_j t} \right) \quad (3.20)$$

siendo  $k$  el número de valores de aceleración y  $j$  el número de series que se utilizan ( $j=0,1,\dots,n/2$ ), y donde  $\omega_j$ ,  $a_j$  y  $b_j$  se definen:

$$\omega_j = \frac{2\pi}{n\Delta t} j \quad ; \quad a_j = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \ddot{u}(t) e^{-i\omega_j t} \quad ; \quad b_j = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \ddot{u}(t) e^{i\omega_j t} \quad (3.21)$$

Por tanto, la función de excitación  $\ddot{u}(z,t)$  y el factor de amplificación del suelo  $A_{m,n}$  estarán relacionados de la siguiente forma:

$$\ddot{u}(kT) = \sum_{j=0}^{n/2} A_{m,n}(\omega_j) (a_{mj} e^{i\omega_j t} + b_{mj} e^{-i\omega_j t}) \quad (3.22)$$

El registro de aceleración debe realizarse en el basamento rocoso. Cuando éste se encuentra a gran profundidad y resulta de difícil acceso, se busca el afloramiento de roca más cercano al emplazamiento, asumiendo que existe continuidad e invariabilidad de la estructura, y se realiza la corrección por profundidad (Cid, 1998; Coral, 2002; Macau, 2008).

Los métodos 1D se han utilizado en numerosas regiones como una primera aproximación del estudio de la respuesta sísmica del suelo. Sin embargo, no tienen en cuenta algunos efectos, como las discontinuidades laterales del suelo, lo que ha provocado que desde hace unos años se estén desarrollando modelos 2D y 3D cada vez más sofisticados, que tratan con una gran cantidad de parámetros. Los estudios que comparan ambas metodologías indican que los complejos métodos 2D y 3D a menudo obtienen resultados análogos a los de los modelos 1D. Esto ha llevado a que se recomiende utilizar modelos sofisticados sólo en el caso en que todos los parámetros involucrados se puedan definir con una incertidumbre limitada. Los métodos 1D, más sencillos y fáciles de manejar, están recomendados para el análisis de estructuras estratificadas horizontalmente y el estudio de la dinámica de los primeros 20-30m del suelo (Bard, 1985; Cid, 1998; Luzón *et al.*, 2002; Fäh, 2006; Tapia *et al.*, 2006).

La metodología a seguir con *ProShake* se detalla a continuación:

#### **A) Entrada de ProShake**

Los parámetros de entrada que se necesitan en cada emplazamiento se detallan a continuación. La mayor parte de los mismos se han obtenido a partir de los resultados

de diversos sondeos geotécnicos realizados en Málaga. Dado que algunos de estos parámetros no se obtienen directamente de los sondeos, también se especifican la metodología seguida y los criterios utilizados (Macau, 2005; Macau, 2008) (figura 3.4):

**a) Parámetros del perfil de estudio:**

a) Profundidad del basamento rocoso (H).

Dado que los sondeos geotécnicos no alcanzan el basamento rocoso en la mayoría de los casos, éste se debe estimar a partir de las frecuencias fundamentales ( $\nu$ ) del suelo halladas previamente mediante el método de Nakamura, y de la velocidad de cizalla  $V_S$  media del perfil, utilizando la expresión:

$$H = \frac{V_{S,media}}{4\nu} \quad (3.23)$$

La velocidad de cizalla  $V_S$  media del perfil se obtiene a partir de las velocidades  $V_{Si}$  y los espesores  $h_i$  de cada capa. Éstos últimos se obtienen directamente de los sondeos geotécnicos, mientras que las velocidades de cizalla se obtienen a partir de los tests SPT:

$$V_{S,media} = \frac{\sum_{i=1}^N V_{Si} h_i}{\sum_{i=1}^N h_i} \quad (3.24)$$

- b) Profundidad del nivel freático  $h_w$ : resultado directo de los sondeos geotécnicos.
- c) Número de capas que componen el perfil (N): resultado directo de los sondeos geotécnicos.

**b) Parámetros de cada capa del perfil:**

- a) Espesor  $h_i$ : resultado directo de los sondeos geotécnicos.
- b) Tipo de material (arenas, arcillas, gravas...): resultado directo de los sondeos geotécnicos.

- c) Peso unitario ( $P_i$ ): se obtiene a partir de las densidades ( $\rho$ ), de los materiales de cada capa:

$$P_i = \rho_i g \quad (3.25)$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad.

En este estudio se han tomado las densidades para cada tipo de material obtenidas por Coral (2002).

- d) Velocidad de las ondas de cizalla ( $V_{si}$ ).

A partir de los ensayos SPT (*Standard Penetration Test*), que se realizan durante los sondeos geotécnicos, se obtienen las velocidades de las ondas de cizalla. Los tests SPT constituyen ensayos de penetración dinámica en los que se mide el grado de compactación del terreno (González de Vallejo *et al.*, 2006).

A partir de los valores  $N_{SPT}$  resultado de los tests SPT, se obtienen las velocidades de cizalla  $(V_s)_{30}$  de cada capa del perfil utilizando las correlaciones entre ambos parámetros propuestas por Cid (1998) para cada tipo de material, a partir de datos experimentales tomados en la ciudad de Tesalónica (Grecia). El valor  $(V_s)_{30}$  representa el promedio de las velocidades de cizalla de los primeros 30m de suelo.

*ProShake* calcula, a partir de  $V_{si}$ , el módulo máximo de cizalla  $G_{max,i}$  de cada capa, indicándose ambos valores en los parámetros dados por el programa.

- e) Curva de variación del módulo de cizalla ( $G$ ) con la deformación ( $\gamma$ ): se obtienen de la base de datos de *ProShake* para cada tipo de material.
- f) Curva de variación del amortiguamiento  $\beta$  con la deformación ( $\gamma$ ): se obtienen de la base de datos de *ProShake* para cada tipo de material.

### c) Acelerograma en roca.

Es necesario disponer de un registro de aceleración en roca como parámetro de entrada en *ProShake*.



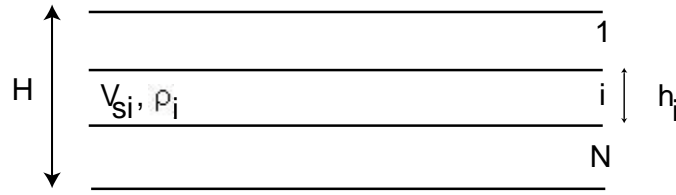


Figura 3.4. Esquema del perfil utilizado en *ProShake*.

### **B) Salida de *ProShake***

Los resultados que proporciona el software *ProShake* básicamente son los siguientes:

- a) Curvas de aceleración, velocidad o desplazamiento de las ondas de cizalla en cada una de las capas del perfil.
- b) Esfuerzos y deformaciones de cizalla (historias temporales o espectros de Fourier).
- c) Espectros de respuesta en cada una de las capas, tanto en aceleración, velocidad o desplazamiento.
- d) Funciones de transferencia entre dos capas cualesquiera del perfil.
- e) Variaciones de distintos parámetros con la profundidad: PGA, PGV, PGD, esfuerzos y deformaciones de cizalla pico, etc.
- f) Cálculo de diversos parámetros en la parte superior de cada capa, como el periodo predominante, la intensidad de Arias, la aceleración, la velocidad o el desplazamiento pico, etc.

En el presente estudio se obtendrán dos resultados básicos en cada uno de los perfiles: la función de transferencia total del perfil entre el basamento rocoso (d), y la capa superficial del suelo, y la intensidad de Arias (f). A partir de la función de transferencia se calcularán las frecuencias fundamentales y las amplificaciones del suelo, y se obtendrá una microzonación sísmica del lugar de estudio. Por otro lado, a partir de las intensidades de Arias en la capa superficial y el basamento de cada perfil, se obtendrán las amplificaciones del suelo en términos de intensidad, necesarias para el estudio de vulnerabilidad que se realizará posteriormente.

### **Intensidad de Arias**

La intensidad de Arias (Arias, 1970), que ya fue definida a comienzos de este capítulo, es un tensor simétrico que considera las tres componentes ortogonales de la aceleración, y se define como:

$$AI = \frac{\pi}{2g} \int |a_i(t)|^2 dt \quad (3.26)$$

donde  $a_i$  son los valores de aceleración de la componente  $i$  en el basamento rocoso más cercano al emplazamiento de estudio.

La intensidad de Arias se puede relacionar con la intensidad macrosísmica a partir de distintas correlaciones empíricas. Cabañas *et al.* (1997) propusieron una relación para la zona del Mediterráneo, obtenida a partir del estudio de registros de movimientos fuertes del suelo de los sismos de Campano Lucano (1980), Umbria (1984), y Lazio-Abruzzo (1984), en Italia, y su correlación con los daños en las viviendas cercanas a los instrumentos de registro:

$$\ln(AI) = 1.5I_L(MSK) - 6.42 \quad (3.27)$$

donde  $I_L$  es la intensidad local en escala MSK.

A partir de los valores de las intensidades de Arias obtenidas en *ProShake*, y utilizando la ecuación 3.27, se pueden hallar las amplificaciones en términos de intensidad en cada uno de los perfiles estudiados:

$$\Delta I = (I_L)_{superficie} - (I_L)_{roca} = \frac{\ln\left(\frac{(AI)_{superficie}}{(AI)_{roca}}\right)}{1.5} \quad (3.28)$$

En *ProShake* se calculan las intensidades de Arias en la parte superior de cada capa, obteniéndose la amplificación  $\Delta I$ , necesaria en los estudios de vulnerabilidad. De esta forma, la intensidad sentida por un edificio durante un terremoto será la suma de la intensidad en roca (dada en los estudios de peligrosidad sísmica a escala regional), y la amplificación del suelo en términos de intensidad en el emplazamiento en que se encuentre:

$$I_{edificio} = I_{roca} + (\Delta I)_{emplazamiento} \quad (3.29)$$

#### 3.1.4. Generación de sismogramas teóricos

Como ya se ha comentado, para obtener las funciones de transferencia del suelo con el programa *ProShake* se necesita un registro de aceleración en roca. Lo ideal sería disponer de uno o varios acelerogramas registrados en la zona, pero esto no siempre es posible.

Cuando no se puede disponer de registros de aceleración en la zona, debe recurrirse a otras técnicas. En este trabajo se han utilizado tres métodos para la obtención de registros teóricos:

- a) Base de datos de movimientos sísmicos europeos. Esta metodología ha sido aplicada anteriormente a la ciudad de Málaga por Macau (2008), dentro del proyecto ERSE. Consiste en seleccionar de la base de datos *strong-motion* europea (Ambraseys *et al.*, 2000), para el periodo 1971-1999, aquellos espectros de respuesta que se ajusten al espectro de respuesta propuesto para la ciudad de Málaga por la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02), tomando aquellos espectros que se encuentren dentro de un rango de confianza de  $\pm 20\%$ . A continuación se toma el acelerograma correspondiente a este espectro de respuesta, y se escala con la PGA propuesta para Málaga por la norma NCSE-02, que es de 0.11g.
- b) Funciones de Green empíricas (que se denominará método EGF, *Empirical Green Function*, en este trabajo): se utilizan terremotos de menor magnitud como funciones de Green empíricas para generar sismogramas teóricos para sismos de mayor magnitud.
- c) Funciones de Green teóricas (método TGF, *Theoretical Green Function*): en este método se generan las funciones de Green utilizando un modelo de Tierra propuesto para la zona de estudio, y a partir de ellas se generan los registros teóricos. Existen diversas metodologías para obtener este tipo de resultados. En este caso se ha aplicado el método de la discretización del número de onda.

A continuación se analizan en detalle las dos últimas metodologías.

#### 3.1.4.1. Método de las funciones de Green empíricas

El método de las funciones de Green empíricas (o método EGF), fue propuesto por Hartzell (1978), como una técnica semiempírica para obtener la información de la fuente sísmica de un terremoto. Se basa en la utilización de registros de dos sismos con una diferencia de magnitudes entre 1.0 y 2.5 grados, registrados en la misma estación y correspondientes a dos terremotos con el mismo hipocentro y similar forma de ondas, con el fin de obtener la STF (*Source Time Function*). De esta forma, se consiguen eliminar los efectos de la trayectoria y el emplazamiento para aislar el efecto de la fuente sísmica. Una desventaja del método EGF es que se limita a las bajas frecuencias, por debajo de la frecuencia esquina de la función de Green, dado el tamaño finito del terremoto menor y un conocimiento generalmente pobre de los parámetros de la fuente de éste (Kanamori, 1979; Frankel y Kanamori, 1983; Irikura, 1983; Mueller, 1985; Frankel *et al.*, 1986; Herrmann y Mandal, 1986; Mori y Frankel, 1990; Buforn, 1994; Irikura y Kamae, 1994; Bour y Cara, 1997; Kamae *et al.*, 1998; Pavic *et al.*, 2000; Kraeva, 2004).

Básicamente, el método consiste en lo siguiente:

Un sismograma  $s(t)$  registrado en una estación es el resultado de la convolución del desplazamiento  $u(t)$  en el foco, la atenuación  $F(Q,t)$  del medio que atraviesa y el factor  $I(t)$  que tiene en cuenta la influencia del instrumento:

$$s(t) = u(t) * F(Q,t) * I(t) \quad (3.30)$$

Dados dos terremotos con epicentros cercanos y profundidades similares pero de magnitudes distintas, si se registran en la misma estación sólo diferirán en los desplazamientos  $u(t)$ . Si ambos terremotos tienen el mismo mecanismo focal, el patrón de radiación de ambos será igual, por lo que éstos sólo se diferenciarán en la función temporal de la fuente sísmica ( $f(t)$ ), y el momento sísmico escalar ( $M_0$ ). Si aplicamos la transformada de Fourier y realizamos el cociente entre los dos sismogramas, tendremos:

$$\frac{s_1(\omega)}{s_2(\omega)} = \frac{u_1(\omega)}{u_2(\omega)} = \frac{f_1(\omega)M_{0,1}}{f_2(\omega)M_{0,2}} \quad (3.31)$$

Si la frecuencia esquina del menor terremoto es mayor que el rango de frecuencias de interés, se puede considerar su función temporal  $f_2(t)$  como una delta de Dirac, cuya transformada de Fourier  $f_2(\omega)$  es igual a la unidad. Por tanto, el cociente entre ambos sismogramas se puede expresar así:

$$\frac{s_1(\omega)}{s_2(\omega)} = \frac{M_{0,1}}{M_{0,2}} f_1(\omega) \quad (3.32)$$

A partir de esta ecuación se obtiene la fuente sísmica (STF) del sismo mayor. Esta técnica puede utilizarse para generar terremotos teóricos de mayor magnitud que los disponibles. Para ello, basta convolucionar el sismo observado con una STF superior a la que le corresponde, obteniendo de esta forma un registro de velocidad o aceleración de un sismo de mayor magnitud.

En este trabajo se ha utilizado esta metodología para generar sismogramas de magnitudes entre 5.5 y 7.0 a partir de las mismas EGF. Se han utilizado fuentes triangulares para los sismos de magnitudes 5.5 y 6.0, y fuentes trapezoidales para los sismos mayores (de magnitudes 6.5 y 7.0), de duraciones entre 1.0 y 8.0s. A continuación se realiza la convolución de la función de Green y la STF, obteniéndose el registro de velocidad del terremoto mayor, y se realizan los espectros de amplitud en desplazamientos de ambos, para comprobar que se estén obteniendo resultados coherentes: el sismo mayor debe tener una mayor parte plana y una frecuencia esquina menor que la función de Green. Por último, se pasa el registro de velocidad a aceleraciones y se aplica un filtro pasa-bajas de Butterworth de tercer orden con la frecuencia esquina de la función de Green. Éste será el registro que se introducirá como acelerograma de entrada en *ProShake*.

Todo el tratamiento de señales y el cálculo de espectros, así como las diversas operaciones realizadas (convolución, transformada de Fourier, paso a aceleraciones y desplazamientos, etc.), se ha realizado con el software *SAC2000* (*Seismic Analysis Code*; Tapley y Tull, 1992).

### 3.1.4.2. Método de la discretización del número de onda

Otra técnica para generar sismogramas teóricos es el método de la discretización del número de onda (Bouchon y Aki, 1977), variante del método más general de integración del número de onda (Kind, 1978; Cormier, 1980; Wang y Herrmann, 1980; Ingate *et al.*, 1983; Ha, 1984).

Se pretende resolver el problema directo, es decir, conocidos el modelo de tierra y la fuente sísmica, calcular los desplazamientos producidos en un punto de la superficie terrestre, donde están localizadas las estaciones. En primer lugar se hallarán los efectos debidos a la estructura terrestre (las funciones de Green), a partir de un modelo de tierra adecuado a la región de estudio. Una vez obtenidas las funciones de Green, se realiza la convolución de éstas con la STF, generando el registro teórico.

Las funciones de Green representan la ecuación del movimiento para una fuerza impulsiva tanto en el espacio como en el tiempo. Para un medio estratificado en capas horizontales, como el caso que se va a utilizar, la simetría del medio permite reducir el número de funciones de Green que deben obtenerse.

Los métodos de integración del número de onda, basados en la transformada de Fourier, generan registros teóricos completos y pueden utilizar modelos complejos con un gran número de capas. Sin embargo, tienen el inconveniente de que el tiempo de computación puede ser elevado (Wang y Herrmann, 1980; Herrmann y Wang, 1985; Herrmann, 2002). El método de la discretización del número de onda (Bouchon, 1979; Alekseev y Mikhailenko, 1980; Bouchon, 1981; Campillo *et al.*, 1984), variante del anterior, supone una forma sencilla de calcular con eficacia funciones de Green para un gran número de casos mediante una formulación matemática sencilla. El método discretiza el campo de radiación mediante la introducción de una periodicidad espacial en la fuente, y se basa en la transformada de Fourier en el dominio de las frecuencias para calcular las funciones de Green. Esta metodología ha sido eficazmente probada con soluciones analíticas y se ha utilizado para probar la precisión de otros métodos, tales como diferencias finitas, elementos finitos, teoría de rayos, métodos pseudo-espectrales o superposiciones modales (Bouchon, 2003).

El programa que se ha utilizado forma parte de un paquete para la generación de sismogramas teóricos creados por Robert B. Herrmann (Herrmann, 2002). El programa

está implementado en *Fortran* y diseñado para utilizar en *UNIX* y *MS-DOS*. Consta a su vez de 3 programas: *hprep96*, que prepara los datos; *hspec96*, que crea las funciones de Green en frecuencias; y *hpulse96*, que convoluciona las funciones de Green con la fuente (STF), creando los sismogramas teóricos buscados.

Para generar estos registros teóricos es necesario disponer de los siguientes datos:

- 1) Un modelo de tierra adecuado a la zona de estudio, descrito por los siguientes parámetros para cada capa: espesor, densidad, velocidades de las ondas P y S y factores de calidad  $Q_p$  y  $Q_s$ . La versión sólo permite utilizar modelos 1D con capas de velocidad constante, en un medio plano, isótropo, estratificado horizontalmente. Al tratarse de un estudio para distancias regionales (menores de 1000km), se ha utilizado un modelo de tierra plana.
- 2) Parámetros focales: latitud, longitud y profundidad. Es posible introducir varias profundidades del foco, obteniéndose distintas series de resultados.
- 3) Coordenadas de las estaciones: latitud, longitud y altura.
- 4) Intervalo de muestreo, número de puntos y hora de comienzo del sismograma teórico deseado. En este estudio, al tratarse con terremotos cuyas STF son de muy corta duración ( $<0.5s$ ), se ha tomado un intervalo de muestreo de 0.10s.
- 5) Orientación de los planos de falla
- 6) Forma y duración de la STF

Una vez recopilados todos estos parámetros, se ejecuta el programa a través de dos scripts creados en lenguaje C por Rivera (2007) (comunicación personal), y modificados para adaptarlos a los datos y la zona del presente estudio.

Las funciones de Green se han generado para las componentes vertical, radial, transversal, y las componentes horizontales (este-oeste y norte-sur).

Esta metodología permite generar sismogramas completos, en los que se incluyen tanto las ondas internas como las superficiales. Sin embargo, sólo podrán reproducirse fielmente los primeros segundos de registro. La parte final de los registros, debida a las múltiples reflexiones en las distintas capas, no puede reproducirse con esta metodología. Otra limitación del método es que sólo se podrán simular las bajas frecuencias, en todo caso menores a 1.0Hz. Para simular registros a altas frecuencias sería necesario conocer muy detalladamente la estructura de la corteza. Además, los modelos de tierra que pueden utilizarse deben ser 1D, sin ser posible utilizar (por el momento), modelos más detallados 2D o 3D. A pesar de estas limitaciones, y dentro de sus posibilidades, se trata de una metodología con la que pueden obtenerse resultados bastante satisfactorios.

### **Elección del modelo de tierra adecuado**

La elección del modelo de tierra es uno de los puntos claves para la obtención de buenos resultados. Los requisitos que debe cumplir un modelo de tierra para utilizarlo en la generación de sismogramas teóricos son:

- Debe ser un modelo regional de la zona de estudio, que comprenda, a ser posible, la trayectoria entre el epicentro y la estación.
- Debe tratarse de un modelo 1D con capas de velocidad constante.
- Debe incluir todos o la mayoría de los parámetros necesarios (número de capas, espesores, velocidades de las ondas P y S, densidades y factores de calidad  $Q_p$  y  $Q_s$ ), y así evitar mezclar parámetros de distintos modelos, para no crear un modelo “híbrido” que podría no representar la zona de estudio.





### 3.2. Vulnerabilidad: método de los índices de vulnerabilidad

#### 3.2.1. Definiciones de parámetros generales utilizados en vulnerabilidad

Se definen brevemente los parámetros básicos de vulnerabilidad que se mencionarán en este apartado. Se dividirán en dos tipos, según el método de vulnerabilidad en que se utilizan: el método empírico y el método mecánico/analítico. Un glosario más detallado de estos conceptos puede encontrarse en otros trabajos, tales como Chávez Morillo (1998), y Giovinazzi (2005).

##### a) Método empírico

- *Índice de vulnerabilidad*: parámetro continuo que mide la disposición de un edificio o grupo de edificios a sufrir daños producidos por un terremoto. Se determina a partir de la información disponible de la tipología y las características estructurales y constructivas del edificio.
- *Grado de daño*: parámetro definido en las escalas macrosísmicas modernas como un valor entero entre 0 y 5, que describe el tipo de daño sufrido por un edificio tras la ocurrencia de un sismo. En la escala europea EMS-98 (Grünthal, 1998), los grados de daño van desde 0 (sin daños estructurales), a 5 (destrucción total), pasando por los grados 1 (ligero), 2 (moderado), 3 (grave), y 4 (muy grave).
- *Grado de daño promedio* ( $\mu_d$ ): parámetro que representa la distribución del daño sufrido por un edificio tras un sismo. Se trata de un factor indirecto que depende del comportamiento sísmico que presente el edificio y de la intensidad del terremoto.  $\mu_d$  es un parámetro continuo que varía entre 0 y 5, en contraste con el grado de daño definido en las escalas macrosísmicas, que es un parámetro discreto.
- *Función de vulnerabilidad*: correlación estadística entre la intensidad macrosísmica y el grado de daño de un edificio, obtenida a partir de daños observados en terremotos del pasado. En ellas se obtiene el grado de daño esperado en un edificio para cierta intensidad macrosísmica conocida su

vulnerabilidad. En este trabajo, la vulnerabilidad del edificio vendrá dada por su índice de vulnerabilidad.

- *Curva de vulnerabilidad*: representa la distribución de la probabilidad de daño de un edificio, en función de la intensidad macrosísmica, conocido su índice de vulnerabilidad.
- *Matriz de probabilidad de daño (MPD)*: matriz que describe la respuesta sísmica de un edificio o conjunto de edificios, a partir de la distribución estadística de los grados de daño para cada valor de intensidad macrosísmica. Expresan la probabilidad de que un tipo de estructura experimente un determinado grado de daño dada cierta intensidad del terremoto. De esta forma, las matrices de probabilidad de daño permiten conocer la distribución de los daños según las distintas clases de edificios (que se clasifican en función de la edad, número de plantas, tipo de edificio, etc.).

#### **b) Método mecánico/analítico**

- *Espectro de demanda*: representación, en un solo diagrama, de los espectros de respuesta del edificio en aceleración y desplazamiento, en el que cada punto corresponde a un periodo de vibración.
- *Espectro de capacidad*: representa la capacidad inelástica del edificio, obtenida a partir del análisis del comportamiento de la estructura al ser sometida a una serie de cargas de gravedad y fuerzas laterales. De esta forma, se obtiene la relación entre los esfuerzos generados sobre el edificio y sus desplazamientos laterales.
- *Punto de desempeño (performance point)*: punto de intersección entre los espectros de demanda y capacidad, que representa la demanda de esfuerzos y desplazamientos del edificio.
- *Curvas de fragilidad*: curvas a partir de las que se obtiene la probabilidad de que un edificio tenga o exceda un grado de daño determinado, en función del desplazamiento espectral de demanda.

### 3.2.2. Conceptos básicos sobre vulnerabilidad sísmica

#### 3.2.2.1. Métodos de evaluación de la vulnerabilidad

La vulnerabilidad sísmica de un edificio se define como su susceptibilidad a sufrir cierto grado de daño ante la ocurrencia de un terremoto. Se trata de una propiedad de la estructura, independiente de la peligrosidad de la región en que se encuentra, y depende de sus características estructurales y de diseño: altura, edad, tipo y calidad de los materiales, regularidad en planta y altura, etc. El estudio de vulnerabilidad sísmica es básico en la elaboración de planes de emergencia, pues generalmente la estimación de las pérdidas humanas y económicas se realiza a partir del número de edificios dañados por un sismo en cierta región (Chávez Morillo, 1998).

El objetivo fundamental de los estudios de vulnerabilidad es obtener el comportamiento sísmico de los edificios (Guéguen *et al.*, 2007). Estos resultados se pueden utilizar para:

- a) Calcular el grado de daño del edificio dado un escenario sísmico determinado.
- b) Evaluar los costes económicos que podrían ocasionar los daños en dicho edificio.
- c) Conocer su contribución a la distribución de pérdidas en el área urbana afectada (en estudios pre o post-sísmicos).
- d) Identificar los edificios más vulnerables, que podrían beneficiarse al ser reforzados ante posibles sismos futuros.

Básicamente pueden distinguirse tres metodologías del análisis de la vulnerabilidad sísmica:

1.- *Los métodos estadísticos (o empíricos)*, están basados en estudios estadísticos de los daños observados tras terremotos ocurridos en el pasado, y su relación con la intensidad sentida en cada emplazamiento. Los resultados se expresan en forma de funciones de vulnerabilidad o de matrices de probabilidad de daño (MPD), donde cada elemento representa la probabilidad de que un edificio de cierta clase sufra un determinado grado de daño como consecuencia de un terremoto de una intensidad dada. Se trata de métodos sencillos que pueden aplicarse a grandes regiones. Sin embargo, al

tratarse de un tratamiento estadístico, su aplicación se restringe a grupos de edificios, con resultados en términos probabilísticos, pero no pueden aplicarse a edificios individuales. Las MPD se han empleado ampliamente en los estudios de vulnerabilidad para definir las distribuciones de daño en cada región de estudio.

2.- *Los métodos mecánicos (o analíticos)*, se basan en el cálculo de la respuesta estructural del edificio, a partir de modelos mecánicos sencillos basados en el método del espectro de capacidad (Freeman, 1998). Los resultados de esta técnica se basan en la obtención de espectros de demanda y capacidad, curvas de fragilidad y puntos de desempeño. Se aplican a edificios que puedan ser representados por modelos mecánicos, y para su estudio suelen elegirse estructuras de gran valor (por ejemplo algún monumento del patrimonio histórico-cultural), o representativas de un gran número de edificios. Asimismo, suelen aplicarse en construcciones en las que no se puedan aplicar los métodos estadísticos (por ejemplo por su complicado diseño), lo que impediría clasificarlos según una tipología determinada. Al contrario que los métodos estadísticos, los métodos mecánicos se aplican sobre estructuras individuales.

3.- *Los métodos basados en el juicio de expertos* se basan en la evaluación de los factores que influyen en la respuesta sísmica de las estructuras. De esta forma puede conocerse su nivel de exposición ante un terremoto. El informe ATC-13 (1985), resultado de un estudio de la evaluación del riesgo sísmico en California, constituye el primer estudio de vulnerabilidad basado en el juicio de expertos. Este estudio se basó en la obtención de MPD con las que estimar los daños producidos por un terremoto de cierta intensidad sobre cierta clase de estructuras, a partir del conocimiento y la experiencia de expertos. A pesar de la incertidumbre relacionada con la obtención de la información, el informe ATC-13 ha sido referente en los estudios de riesgo sísmico y estimación de pérdidas hasta mediados de los años 90 (Giovinazzi, 2005).

La elección de la metodología de vulnerabilidad a utilizar depende del tipo de información de la estructura que se pueda obtener, lo cual también influirá en si la técnica puede emplearse sobre edificios individuales o sobre un conjunto de estructuras. Sin embargo, en todos los casos los resultados de un estudio de vulnerabilidad deben darse en términos probabilísticos: la vulnerabilidad de un edificio debe obtenerse como una relación probabilista entre la intensidad del terremoto y el grado de daño esperado (Augusti *et al.*, 2000). Por otro lado, los parámetros de entrada de los estudios de

vulnerabilidad, provenientes de los estudios de peligrosidad sísmica, pueden ser de dos tipos: parámetros físicos (PGA, PGV, PGD, etc.), o macrosísmicos (intensidad). Se emplearán unos u otros dependiendo del tipo de metodología que se emplee.

Un análisis en profundidad de las clasificaciones de los distintos métodos de vulnerabilidad puede encontrarse en Chávez Morillo (1998), Bonett (2003) o Giovinazzi (2005).

### **3.2.2.2. Estudios de vulnerabilidad en Europa**

Entre los estudios de vulnerabilidad más recientes en Europa cabe destacar el proyecto Risk-UE (2001-2004) (Mouroux y Le Brun, 2006), cuyo objetivo era la obtención de escenarios sísmicos basados en la ocurrencia de terremotos realistas en un contexto europeo, y su aplicación práctica a siete ciudades de Europa: Barcelona (España), Bitola (República Yugoslava de Macedonia), Bucarest (Rumanía), Catania (Italia), Niza (Francia), Tesalónica (Grecia) y Sofía (Bulgaria). Se trataba de un proyecto que incluía tanto estudios de peligrosidad sísmica como de vulnerabilidad en edificios ordinarios, históricos y monumentos, así como la obtención de escenarios sísmicos. En aquel momento ya existían proyectos similares aplicados a otras regiones del mundo, tales como HAZUS (1999) en Estados Unidos, o RADIUS (1999) a nivel global. Sin embargo, no se habían desarrollado estudios de este tipo a nivel europeo, los cuales se hicieron imprescindibles tras el impacto político que causaron los terremotos de Izmit (Turquía) y Atenas (Grecia), de 1999.

El proyecto consistía en un estudio muy completo del riesgo sísmico, dividido en siete partes, que incluían la generación de una base de datos en Sistema de Información Geográfica (SIG), un estudio de la peligrosidad regional y local en cada ciudad, la obtención de escenarios sísmicos y un análisis de la vulnerabilidad de los edificios urbanos, tanto los ordinarios como los monumentos y edificios emblemáticos.

El estudio de vulnerabilidad dentro del proyecto Risk-UE se llevó a cabo desde dos perspectivas distintas, siguiendo una clasificación similar a la propuesta por Dolce *et al.* (1994) (Lagomarsino, 2007). De esta forma, la vulnerabilidad de los edificios ordinarios y de los monumentos se estudiaba en dos niveles distintos:

- Nivel I: aproximación macrosísmica: en este nivel, el parámetro de entrada es la intensidad macrosísmica, y la vulnerabilidad se relaciona con parámetros cualitativos.
- Nivel II: aproximación mecánica: en él, el parámetro de entrada es la PGA o el espectro de respuesta del terremoto de estudio, y la vulnerabilidad del edificio viene descrita por su curva de capacidad.

El método del nivel I se basa en la clasificación de los edificios por su tipología estructural. El modelo más eficiente de este tipo es el *método del índice de vulnerabilidad*, en el que se asigna este factor a cada edificio en función de su tipología, y se añaden unas correcciones basadas en los parámetros característicos de cada construcción individual (estado de mantenimiento, regularidad en planta, etc.). Se trata de una metodología rápida y sencilla que permite obtener escenarios de daño para cada tipología estructural, y que da una idea global de la vulnerabilidad de los edificios ordinarios, históricos o monumentales de una ciudad.

El método del nivel II, por el contrario, se basa en la obtención de información muy precisa de cada uno de los elementos de que se compone el edificio o monumento de estudio, llamados macroelementos, caracterizados por presentar una respuesta sísmica independiente del resto. Se trata de una metodología lenta y detallada pensada para conocer en profundidad el comportamiento sísmico de una construcción en particular, por ejemplo aquéllas caracterizadas por su alto valor histórico o cultural. La metodología es muy similar al método mecánico del espectro de capacidad mencionado más arriba.

Para realizar un estudio de vulnerabilidad de los monumentos de una ciudad, el número de éstos presentes en la misma hace que sea imposible una evaluación detallada de cada uno de ellos (mediante el método del espectro de capacidad), salvo en aquellos casos específicos de monumentos de especial relevancia, que deseen ser estudiados de forma independiente. Sin tener en cuenta esos casos, se recomienda estudiar la vulnerabilidad de los monumentos de una ciudad utilizando una escala territorial, por ejemplo mediante las técnicas de nivel I del proyecto Risk-UE (Lagomarsino, 2006). El método del índice de vulnerabilidad aplicado a los monumentos es el que se utilizará en este trabajo, y su técnica se explicará en detalle en el apartado 3.2.3.

### **3.2.2.3. La vulnerabilidad en los centros urbanos**

Las ciudades, con una gran concentración de habitantes y edificaciones, así como centro de actividades y servicios, son, a efectos de riesgo sísmico, regiones con gran potencial de sufrir los mayores daños en pérdidas humanas, materiales y económicas, en caso de producirse un terremoto. Las grandes ciudades situadas en áreas de sismicidad baja o moderada tienden a infravalorar el peligro sísmico, descuidando las precauciones básicas ante la posible ocurrencia de un sismo; esto hace que aumente su vulnerabilidad y con ello el riesgo sísmico. Por otro lado, muchas ciudades en zonas de sismicidad alta han crecido de forma descontrolada, lo que conlleva un aumento del riesgo sísmico, al aumentar el coste de pérdidas humanas y económicas que podría acarrear la ocurrencia de un terremoto (Mena, 2002; Lantada *et al.*, 2008).

La reducción de la vulnerabilidad sísmica de los edificios urbanos, a partir de la correcta utilización de las normas de construcción sismorresistentes de los nuevos edificios y el refuerzo de los ya existentes, es uno de los objetivos principales de los numerosos estudios de vulnerabilidad publicados en los últimos años. Por desgracia, algunos de los más destructivos terremotos recientes han puesto de manifiesto la necesidad de realizar este tipo de estudios en los recintos urbanos: una alta vulnerabilidad de los edificios urbanos puede dar lugar a enormes pérdidas humanas y económicas: 18.000 muertos y 320.000 viviendas dañadas (Turquía, 1999); 80.000 muertos y 780.000 edificios afectados (Pakistán, 2005) constituyen ejemplos que hablan por sí solos (Lantada, 2007). La relación entre el colapso de los edificios urbanos y las víctimas mortales durante los terremotos es tal que algunos autores llegan a afirmar que aproximadamente el 90% de las muertes de personas en los sismos del siglo XX están directamente relacionadas con el colapso de los edificios en las ciudades (Lantada *et al.*, 2008).



#### **3.2.2.4. La vulnerabilidad de edificios históricos y monumentos**

En el pasado, el concepto “monumento” se aplicaba solamente a las construcciones de especial relevancia, a aquellas construidas por arquitectos conocidos, etc. En la actualidad, sin embargo, la necesidad de conservar nuestro patrimonio histórico y cultural ha aumentado considerablemente. A lo largo de este trabajo, se denominará “monumento” a cualquier elemento constructivo para el que se activen los sistemas de conservación y preservación, de acuerdo con la definición dada dentro del proyecto Risk-UE (Lagomarsino *et al.*, 2003).

Los terremotos constituyen una de las principales causas de los daños irreparables y la pérdida de los monumentos que forman parte de nuestro patrimonio histórico, artístico y cultural. La mayoría de estos monumentos, al ser anteriores al siglo XIX, son estructuras de mampostería, cuya respuesta sísmica es una de las más complicadas de obtener. Se trata de una de las tipologías más difíciles de modelar, debido a su complejidad tecnológica y constructiva, y también debido al comportamiento mecánico no lineal que presenta la mampostería (Lagomarsino *et al.*, 2003).

Por otro lado, la sismicidad de la región en que se encuentre el monumento determina en buena medida su técnica constructiva, así como el momento en que se construyó, inmediatamente después de un fuerte sismo en la zona o décadas después. En áreas de alta sismicidad, los monumentos se solían construir con técnicas de refuerzo específicas para poder hacer frente a un posible sismo. Sin embargo, en zonas de sismicidad moderada estas técnicas sólo se empleaban si el edificio se construía inmediatamente después de un terremoto de magnitud apreciable. Pasadas dos o tres generaciones, la importancia de estas técnicas de refuerzo se perdía, aumentando la vulnerabilidad de los monumentos (Lagomarsino, 2006). Esta diferenciación en las técnicas constructivas en función de la sismicidad de la región puede verse claramente en España, donde un estudio reciente ha mostrado cómo todas las Catedrales españolas de Andalucía y Cataluña son enjutas (construidas mediante sistemas antisísmicos), mientras que todas aquellas construidas en Galicia o Castilla (de menor actividad sísmica), son no enjutas (Cassinello, 2007).

Debe hacerse notar que los monumentos son edificios vulnerables incluso aunque estén contruidos con materiales de buena calidad, debido a sus grandes dimensiones: paredes anchas, torres esbeltas, amplios espacios...(Giovinazzi, 2005; Lagomarsino, 2006). Este hecho, unido a lo especificado anteriormente y al carácter único de los monumentos de nuestro patrimonio, permite tener una clara idea de la importancia de los estudios de los últimos años centrados en su conservación y las posibles formas de reforzarlos frente a posibles sismos en el futuro. Además, algunos estudios recientes han puesto de relieve que las técnicas de refuerzo en monumentos y edificios de mampostería llevadas a cabo en los últimos años (tales como los tejados de hormigón armado), son a menudo dudosas en cuanto a su función de refuerzo antisísmico, como han puesto en evidencia terremotos recientes. Es más, incluso se llega a afirmar que los trabajos de refuerzo de los últimos 50 años en algunos edificios de mampostería han supuesto un aumento en su vulnerabilidad sísmica (Lagomarsino y Podestà, 2004c).

Las técnicas de refuerzo de los monumentos y edificios históricos son un tema de gran complejidad y polémica, pues muchos autores opinan que producen una pérdida de autenticidad de los mismos. En la actualidad se busca una solución que encuentre un equilibrio entre la seguridad e integridad del edificio y la necesidad de preservar la estructura original del monumento. Por otro lado, no existen catálogos detallados con los daños sísmicos producidos en los monumentos, donde aparezca su localización, tipología, daños ocasionados, reformas realizadas, etc., salvo en contadas excepciones (Italia, Portugal), lo que haría más sencilla su correlación con la intensidad macrosísmica, el tipo de suelo, etc. (Sousa, 2003; Lagomarsino y Podestà, 2004c).

La experiencia dada por los terremotos pasados ha mostrado que las iglesias son monumentos especialmente vulnerables. Algunos de los últimos terremotos especialmente dañinos con los monumentos fueron el de Guatemala (1976), donde se dañaron una gran cantidad de iglesias y la Catedral quedó completamente destruida; Irpinia (Italia, 1980); o México (1999), con importantes daños en unas 600 iglesias. Pero fue la serie sísmica de Umbria-Marche (Italia), de 1997, la que afectó especialmente a los monumentos, en la que más de 2000 iglesias sufrieron daños significativos (Lagomarsino, 1998). Este evento sirvió para recopilar una gran cantidad de información de la vulnerabilidad de las iglesias, que más adelante sirvió para crear una nueva metodología para su estudio incluida en el proyecto Risk-UE. Además, en

varios sismos italianos de baja intensidad ocurridos en 1995, 2000 y 2003, se observó que las iglesias eran el único tipo de estructuras que sistemáticamente presentaba algún tipo de daño (Sousa, 2003; Lagomarsino, 2006). Más recientemente, el terremoto de Italia del 6 de abril de 2009, que destruyó casi en su totalidad la ciudad de L'Aquila, ha provocado daños irreparables en una gran cantidad de iglesias del centro de Italia (MCEER, 2009).

Estos daños provocados en los monumentos en los últimos años han puesto de relieve su vulnerabilidad y la necesidad de su estudio para evitar mayores daños en el futuro. Por ello, y a pesar de que la mayoría de los estudios generales de riesgo sísmico o específicos de vulnerabilidad se centran en los edificios ordinarios, la conciencia de la posible pérdida del patrimonio ha hecho que surjan en los últimos años estudios de vulnerabilidad de iglesias o de monumentos en general, tanto sobre los daños causados en el pasado como sobre la aplicación de nuevas metodologías. Algunos de los estudios de vulnerabilidad en monumentos más recientes son los de Augusti *et al.* (2000, 2001 y 2002), Lagomarsino *et al.* (2003), Sousa (2003), Irizarry (2004), Lagomarsino y Podestà (2004a, 2004b y 2004c), Lagomarsino *et al.* (2004), Lagomarsino (2006), Cassinello (2007), Goded *et al.* (2007) y Lagomarsino y Resemini (2009).

A modo de resumen, baste reproducir la descripción realizada por otros autores sobre la necesidad de proteger los centros históricos europeos, así como sus monumentos, que forman parte de nuestro patrimonio artístico, histórico y cultural:

*“Europe’s historical structures, until the middle of this century, consists almost entirely of masonry buildings. Not only the numerous notable individual monuments, but also the entire historic centres of most European centres are now recognised as vital elements of these historical structures; and in many areas, these building groups are in need of protection from natural as well as man-made hazards, of which perhaps the earthquake hazard is the most destructive”* (Spence *et al.*, 2000).

### 3.2.3. El método de los índices de vulnerabilidad. Aplicación a monumentos y edificios históricos

El método de los índices de vulnerabilidad se basa en el hecho de que ciertas clases de estructura que comparten el mismo comportamiento mecánico y los mismos patrones de carga, presentan los mismos tipos de daños tras producirse un terremoto. De esta forma, se pueden clasificar los edificios en distintas tipologías y desarrollar unas funciones de vulnerabilidad para cada una de ellas basadas en las observaciones de daños en sismos pasados (Irizarry, 2004).

Este método se ha desarrollado en los últimos 25 años dentro del *Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti* (GNDT; Corsanego y Petrini, 1994). Esta técnica se ha aplicado y revisado a lo largo de los años (Benedetti y Petrini, 1984; Bernardini, 1997; Dolce, 1997; Bernardini, 2000). Recientemente, la metodología para edificios ordinarios ha sido mejorada, proponiéndose una nueva metodología macrosísmica a partir de matrices de probabilidad de daño (MPD), implícitamente contenidas en la escala EMS-98 (Grünthal, 1998), para cada una de las 6 clases de vulnerabilidad allí definidas (Bernardini *et al.*, 2007). Se trata de una metodología versátil, sencilla y robusta, en la que la vulnerabilidad de los edificios se caracteriza de forma sencilla, pudiendo ser muy detallada en cuanto a las características específicas de cada construcción (Lantada, 2007).

El método del índice de vulnerabilidad propuesto en el proyecto Risk-UE para edificios históricos y monumentales, se basa en la clasificación de las tipologías de los monumentos y la función de vulnerabilidad propuestas por Lagomarsino *et al.* (2003), que divide los mismos en 13 tipologías: palacios, monasterios, castillos, iglesias, ermitas, mezquitas, teatros, torres, puentes, muros, arcos del triunfo, obeliscos y estatuas.

La caracterización del comportamiento sísmico de cada tipología se llevó a cabo mediante un análisis estadístico de los daños observados en sismos italianos durante 30 años, especialmente en los terremotos de Friuli (1976), y Umbria-Marche (1996, 1997). Este análisis estadístico se ha realizado para los palacios y las iglesias, con los que se definieron MPD, a partir de las cuales se puede conocer, dada una cierta intensidad, la distribución esperada del grado de daño producido en el edificio. Para el resto de

tipologías, el comportamiento sísmico se obtuvo tomando como referencia las iglesias y los palacios, y a partir del juicio de expertos (Lagomarsino *et al.*, 2003; Irizarry, 2004; Giovinazzi, 2005).

Cada monumento viene caracterizado por un índice de vulnerabilidad ( $V_I$ ). Este índice se obtiene como la suma de dos contribuciones: la tipología del edificio, y la suma de una serie de correcciones debidas a las características específicas de cada monumento particular. A su vez, estas correcciones se dividen en dos clases: las correcciones generales que se aplicarán a todas las tipologías (calidad de la mampostería, estado de mantenimiento, si ha sufrido transformaciones estructurales o intervenciones recientes, etc.), y las correcciones particulares que dependen de la tipología (por ejemplo, en el caso de las iglesias se debe tener en cuenta el número de naves, la existencia de torres o cúpulas y arcos, etc.). La elección de los correctores para cada tipología se ha realizado empíricamente, basándose en la observación de los patrones de daño típicos de cada una de ellas. El índice de vulnerabilidad se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$V_I = V_{it} + \sum_{i=1}^N \Delta V_{im} \quad (3.33)$$

donde  $V_{it}$  es el índice de vulnerabilidad del edificio debido a su tipología, y  $\Delta V_{im}$  son los correctores del índice de vulnerabilidad debidos a las características particulares del monumento, que a su vez se pueden dividir en las correcciones generales ( $\Delta V_{ig}$ ), comunes a todas las tipologías, y las características particulares del edificio según su tipología ( $\Delta V_{ip}$ ):

$$\sum_{i=1}^N \Delta V_{im} = \sum_{i=1}^{N_1} \Delta V_{ig} + \sum_{i=1}^{N_2} \Delta V_{ip} \quad (3.34)$$

Los índices de vulnerabilidad de cada tipología se muestran en la tabla 3.1. Teniendo en cuenta las incertidumbres en el análisis estadístico, se proponen tres valores de  $V_i$  para cada tipología. Se indica además el parámetro  $\phi$  asignado a cada tipología, que representa la pendiente de la curva de vulnerabilidad. En el anexo VI se muestran todos los correctores de  $V_i$  que deben aplicarse en cada caso.

Tabla 3.1. Índice de vulnerabilidad y parámetro  $\phi$  para cada tipología de monumento

Tipología del monumento	$V_i$ inferior	$V_i$ medio	$V_i$ superior	$\phi$
Palacios/edificios	0.496	0.616	0.956	2.3
Monasterios/conventos	0.616	0.736	1.076	2.3
Castillos	0.356	0.456	0.766	2.3
Iglesias	0.77	0.89	1.26	3.0
Ermitas/oratorios/capillas	0.65	0.77	1.14	3.0
Mezquitas	0.67	0.73	0.94	2.65
Teatros	0.616	0.736	1.086	2.65
Torres/campanarios	0.636	0.776	1.136	2.3
Puentes	0.216	0.296	0.566	2.3
Muros	0.396	0.496	0.746	2.3
Arcos del triunfo	0.376	0.456	0.706	2.3
Obeliscos	0.396	0.456	0.746	1.95
Estatuas/fuentes	0.236	0.296	0.606	1.95

Estos índices y correctores de vulnerabilidad se utilizan para obtener el grado de daño esperado de cada monumento, a partir de su curva de vulnerabilidad. La distribución del daño esperado de cada tipología frente a la intensidad macrosísmica (obtenida a partir del análisis estadístico de los terremotos italianos), permite dibujar las curvas de vulnerabilidad para cada tipología (figuras 3.5 y 3.6). Estas curvas, en las que se representa el grado de daño promedio  $\mu_d$  frente a la intensidad  $I$ , vienen caracterizadas para cada tipología de monumento a partir de dos parámetros: el índice de vulnerabilidad  $V_i$  y el parámetro  $\phi$ . El primero define la posición en la curva, y el segundo la pendiente de la misma. La función de vulnerabilidad  $\mu_d$  propuesta por Lagomarsino *et al.* (2003) para monumentos (ecuación 3.35), fue propuesta por Sandi y Floricel (1994), como representación de las curvas de vulnerabilidad, y ya fue utilizada por Giovinazzi y Lagomarsino (2002), para edificios ordinarios. Se define como:

$$\mu_d = 2.5 \left[ 1 + \tanh \left( \frac{I + 6.25V_i - 13.1}{\phi} \right) \right] \quad (3.35)$$

En las figuras 3.5 y 3.6 se muestra un ejemplo de la influencia de las variaciones del índice de vulnerabilidad y el parámetro  $\phi$  en la curva de vulnerabilidad de un monumento. Puede observarse cómo a mayor índice de vulnerabilidad, mayor grado de daño, para una intensidad dada (figura 3.5). Por otro lado, el parámetro  $\phi$  controla la pendiente de la curva de vulnerabilidad, siendo ésta mayor a medida que  $\phi$  decrece (figura 3.6):

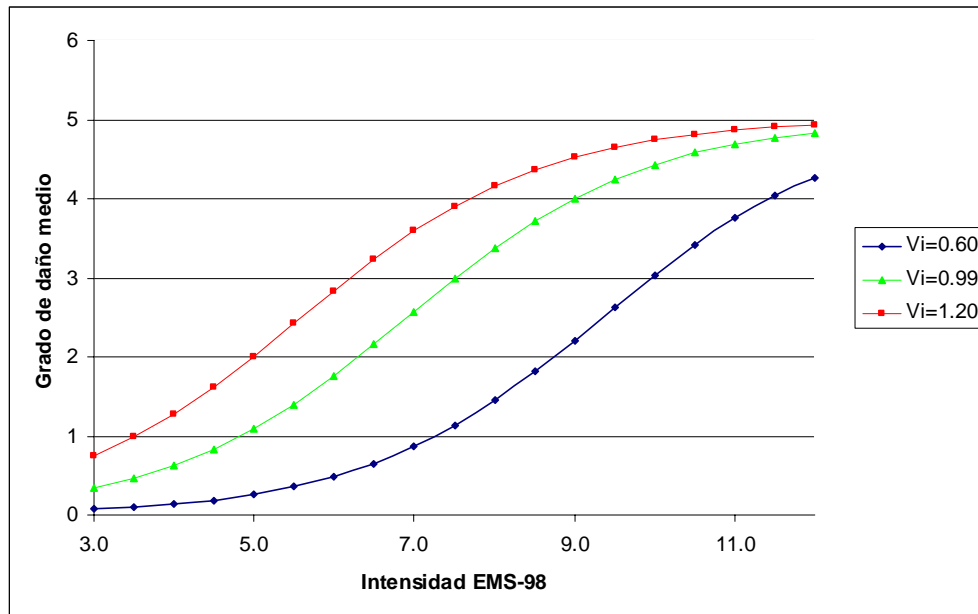


Figura 3.5. Influencia de la variación del índice de vulnerabilidad en el grado de daño promedio

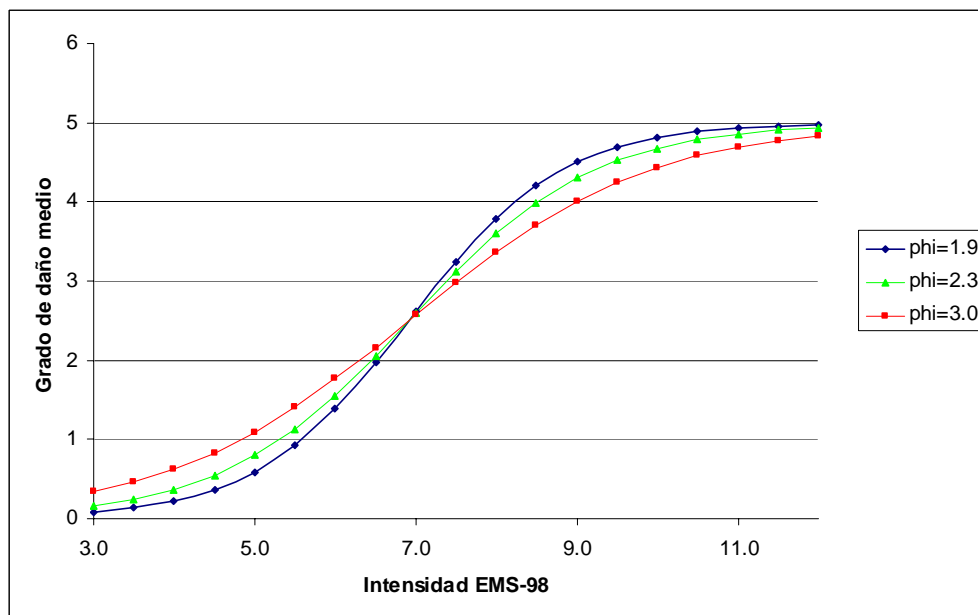


Figura 3.6. Influencia de la variación del parámetro  $\phi$  en el grado de daño promedio

Una vez halladas las curvas de vulnerabilidad de los monumentos, se pueden obtener sus probabilidades de daño, es decir, la probabilidad de que el edificio sufra un grado de daño determinado como consecuencia de cierto grado de intensidad. Estas probabilidades se hallan partiendo de la idea de que los histogramas de los daños observados se pueden ajustar a una distribución binomial definida por un solo

parámetro: el grado de daño promedio  $\mu_d$  (Braga *et al.*, 1982). La probabilidad de daño  $p_k$  asociada al grado de daño  $k$  se define según la siguiente expresión:

$$p_k = \frac{5!}{k!(5-k)!} \left( \frac{\mu_d}{5} \right)^k \left( 1 - \frac{\mu_d}{5} \right)^{5-k} \quad (3.36)$$

De esta forma, una vez caracterizados los monumentos por su índice de vulnerabilidad (ecuación 3.33), se puede obtener la distribución de su grado de daño promedio en función de la intensidad macrosísmica (ecuación 3.35), a través de las curvas de vulnerabilidad. Suponiendo una situación sísmica concreta, en la que el edificio sufriría un grado de intensidad determinado, se obtiene, de esta forma, el grado de daño promedio, y, en esa situación concreta, la probabilidad de que ese edificio sufra cada uno de los 6 grados de daño  $k$  (de 0 a 5), definidos en la escala EMS-98. Las probabilidades de daño para cada grado de daño pueden representarse en forma de histogramas o en forma matricial, donde se expresa la probabilidad de daño para cierta intensidad y cierto grado de daño  $k$ . Por otro lado, dado que se han dado tres valores de los índices de vulnerabilidad en esta metodología (el índice medio y los extremos superior e inferior; ver tabla 3.1), se pueden obtener las distribuciones de los daños medio, inferior y superior y sus correspondientes probabilidades de daño, acotando de este modo los daños y sus probabilidades esperadas para cada monumento.



A modo de resumen, se indican los pasos que deben darse para aplicar la metodología de los índices de vulnerabilidad:

- 1.- Recopilación de los monumentos cuyo estudio de vulnerabilidad se desea realizar, así como la información relativa a su tipología, estado de conservación, calidad de los materiales de construcción, reformas realizadas, altura, etc.
- 2.- Cálculo del índice de vulnerabilidad del monumento, a partir de la información obtenida en el punto anterior.
- 3.- Obtención de las curvas de vulnerabilidad de los monumentos, en las que se representa el grado de daño promedio frente a la intensidad macrosísmica. Estas curvas se pueden realizar tanto para cada tipología de monumento a estudiar, como para cada edificio individual.
- 4.- Comparación, cuando sea posible, de las curvas de vulnerabilidad de los monumentos con los daños sufridos en terremotos pasados. De esta forma se obtiene una primera validación de la aplicación de la metodología (basada en estudios estadísticos de datos italianos), a la región de estudio.
- 5.- Cálculo de las probabilidades de daño para cada uno de los grados de daño, dada una situación sísmica determinada, caracterizada por su intensidad macrosísmica. La intensidad que sufriría cada monumento viene dada por el escenario sísmico que se desee estudiar, y las amplificaciones en intensidad del suelo obtenidas en estudios de efectos locales del suelo.
- 6.- Comparación, en la medida de lo posible, de los grados de daño correspondientes a la mayor probabilidad de daño, con grados de daños reales evaluados para los monumentos en terremotos pasados, obteniendo así una segunda validación de la aplicación del método a la zona de estudio.

### 3.3. Escenarios sísmicos

Además del estudio de vulnerabilidad mediante el método del índice de vulnerabilidad, uno puede plantearse la pregunta de qué sucedería si ocurriera un terremoto de unas características concretas en una región, y cómo afectaría esto a los monumentos de su patrimonio. Esta cuestión puede responderse mediante el estudio de escenarios de daño, que se definen como la descripción y evaluación de los posibles efectos de un sismo determinado sobre una región (López Arroyo y Villacañas, 1999). Hay dos tipos de escenarios que pueden estudiarse: uno determinista basado en un terremoto concreto (en general uno de las mismas características que los que se han producido en la región en el pasado); y uno probabilista, basado en las normas de construcción sismorresistentes, que caracterizarán la zona asignándole una intensidad determinada para cierto periodo de retorno, basada en la sismicidad pasada de la región.

A continuación se explicará brevemente la metodología para la obtención de ambos escenarios.

#### 3.3.1. Escenario determinista

La idea de esta metodología es tomar un terremoto ocurrido en el pasado (y que, por tanto, tiene unos parámetros focales conocidos), en la región de estudio y responder a la pregunta de cómo afectaría a los edificios si se volviera a producir un sismo de las mismas características. Para ello, debe conocerse la intensidad que afectaría a cada uno de ellos. Esta intensidad se obtiene a partir de la intensidad epicentral del terremoto a la que se aplica una ley de atenuación con la distancia para conocer la intensidad en la zona de estudio. En este estudio, el efecto de la atenuación sísmica se ha realizado mediante el ajuste a una curva de atenuación tipo Sponheuer (1960), a partir de la cual se obtiene la intensidad en la zona de estudio:

$$I_0 - I = k \log \left( \frac{\sqrt{x^2 + h^2}}{h} \right)^b + k\gamma \log e \left( \sqrt{x^2 + h^2} - h \right) \quad (3.37)$$

donde  $I_0$  es la intensidad epicentral,  $I$  la intensidad en la zona de estudio,  $k$  el factor que relaciona la intensidad con el logaritmo de la aceleración pico del suelo,  $x$  la distancia epicentral (en km),  $h$  la profundidad del foco (en km),  $b$  el coeficiente de expansión geométrica del frente de ondas, y  $\gamma$  el coeficiente de atenuación inelástica del medio. De esta forma, ajustando esta ecuación a los datos de intensidad de la región en algún terremoto pasado, y fijando el valor de  $\gamma$ , se obtienen la profundidad  $h$  del foco y el parámetro  $b$ . Una vez obtenidos, se calcula la curva de atenuación para la región, tomando un terremoto ocurrido en el pasado y, a partir de la distancia del epicentro a la zona de estudio, se hallan las intensidades de los monumentos, suma de la intensidad obtenida mediante el ajuste de la curva de atenuación (ecuación 3.37), y la aplicación de las amplificaciones en términos de intensidad obtenidas en los estudios de microzonación, obteniendo así las posibles diferenciaciones en los tipos de suelos en que están ubicados los monumentos (Irizarry *et al.*, 2007; Lantada, 2007).

Una vez conocidas las intensidades que afectan a cada edificio, se repiten los pasos seguidos en el estudio de vulnerabilidad: obtención de los índices de vulnerabilidad, los grados de daño promedios y las probabilidades de daño de cada uno de los edificios. El resultado final del escenario determinista serán unos histogramas que muestren el porcentaje de monumentos con cada grado de daño, y el porcentaje de los mismos con cada probabilidad de daño, para los 6 grados de daño de la escala EMS-98. A pesar de que se puedan obtener las curvas de vulnerabilidad de cada uno de los edificios, y los histogramas con la distribución de las probabilidades de daño, se trata de un estudio estadístico, por lo que el resultado final debe ser siempre el conocimiento de qué porcentaje de los edificios estudiados sufriría daños severos, graves o ligeros si se produjese un terremoto de esas características.

### **3.3.2. Escenario probabilista**

En este caso, en lugar de tratar de reproducir un sismo ocurrido en el pasado, se toma un sismo característico de la zona de estudio según términos probabilistas. En nuestro caso se utilizará la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02), para un periodo de retorno de 500 años. En ella, a cada región española se le asigna una intensidad en la escala EMS-98, que constituirá el escenario probabilista buscado.

A ese valor de intensidad se le aplicarán, una vez más, las amplificaciones en términos de intensidad obtenidas en el estudio previo de microzonación, obteniendo así las intensidades que afectarían a cada edificio en función de su ubicación.

De nuevo, como en el escenario anterior, se calculan los grados de daño promedio y las probabilidades de daño, así como los histogramas que indiquen el porcentaje de edificios con cada grado de daño promedio y con la probabilidad de daño para cada grado de daño. Los resultados finales de ambos escenarios se pueden comparar, conociendo de esta forma qué escenario sería más peligroso para el conjunto de los monumentos estudiados.



---

## *Capítulo 4*

### *Efecto de sitio: Microzonación*

---



#### 4.1. Introducción

En este capítulo se pretenden analizar en detalle los efectos locales del suelo del la zona centro de la ciudad de Málaga, y realizar una microzonación específica de dicha región, comparándola con los daños causados por el terremoto de 1680 en esa zona. En aquella época, la ciudad ocupaba el actual centro histórico de Málaga. Además, en dicha zona se concentra el mayor número de monumentos de la ciudad. Por ello se ha decidido estudiar en detalle el centro de Málaga, que ya demostró en terremotos pasados (en especial el de 1680), la gran diferencia de daños que pueden presentarse en esta región, a pesar de su pequeña superficie.

La ciudad se encuentra ubicada en la costa occidental del mar de Alborán, entre las desembocaduras de los ríos Guadalmedina y Guadalhorce, y rodeada por los Montes de Málaga. Varios montes forman parte de la ciudad, destacando en especial la colina de la Alcazaba y el castillo de Gibralfaro.

Desde el punto de vista geológico, la provincia de Málaga se encuentra en la parte occidental de la cordillera Bética. La ciudad de Málaga se sitúa en la Zona Interna de las Béticas, en una depresión conocida como la “Hoya de Málaga” (figura 4.1), que constituye la franja de separación entre los relieves de los mármoles tableados azules de la unidad de Ojén (que forma parte del Complejo Alpujárride Occidental), al oeste, y las grauwas, filitas y areniscas del Complejo Maláguide, al este y el norte. Una de las mejores representaciones del Complejo Maláguide (conjunto tectónico superior de la Zona Interna bética), se encuentra en las cercanías de la capital.

La Hoya de Málaga está formada por sedimentos continentales post-mantos o post-orogénicos del Plioceno (arcillas y arenas arcillosas), depositados sobre los complejos Alpujárride y Maláguide. Sobre ellos aparecen depósitos cuaternarios, en las zonas de la costa y las orillas de los dos ríos malagueños (Clavero y Ramos, 2005; Serrano y Guerra, 2005; Clavero, 2006; Macau *et al.*, 2006).



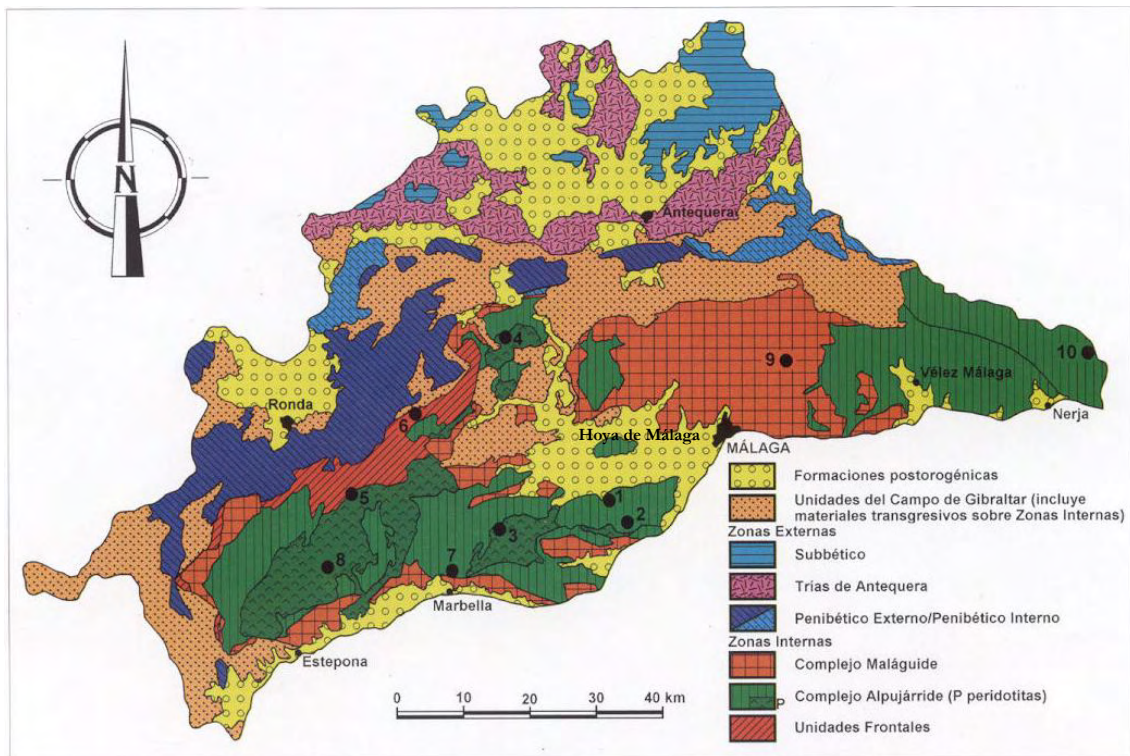


Figura 4.1. Mapa geológico de la provincia de Málaga (Serrano y Guerra, 2005)

Los materiales que afloran en la ciudad de Málaga son:

- Materiales del Complejo Maláguide en la mitad oriental y el noroeste de la ciudad.
- Materiales cuaternarios a lo largo de la costa, en los márgenes de los ríos Guadalmedina y Guadalhorce y al pie de ciertas colinas.
- Materiales Pliocenos, dispuestos entre los materiales cuaternarios y el Complejo Maláguide.

En el anexo I se muestra un mapa geológico detallado de la ciudad de Málaga.

En este estudio se parte de dos estudios previos de los efectos locales del suelo realizados dentro del proyecto ERSE en todo el distrito de la ciudad. En el primero de ellos (Clavero y Ramos, 2005), se realizó una primera microzonación de la ciudad en función del coeficiente C definido en la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02). En el segundo estudio (Macau, 2008), se utilizó la microzonación

de Clavero y Ramos (2005), y se caracterizaron cada una de las zonas de la ciudad mediante sus frecuencias fundamentales, funciones de transferencia y amplificaciones del suelo en términos de intensidad, trazando un mapa de peligrosidad sísmica local de toda la ciudad.

El coeficiente  $C$  se propone como un coeficiente de amplificación del terreno utilizado en la obtención de la aceleración sísmica de cálculo. Su valor (dado por la ecuación 4.1), se obtiene determinando los espesores  $e_i$  para cada uno de los cuatro tipos de terreno existentes en los 30 primeros metros de suelo:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^4 C_i e_i}{30} \quad (4.1)$$

donde los valores de  $C_i$  vienen dados en la tabla 4.1. Su valor depende de las características geotécnicas y de compactación del terreno. La norma NCSE-02 divide el terreno en cuatro tipos (que dependen del tipo de material y la velocidad de las ondas de cizalla,  $V_s$ ), y establece un valor del coeficiente  $C$  para cada uno de ellos (tabla 4.1).

Tabla 4.1. Microzonación de Málaga según el coeficiente  $C$   
(norma NCSE-02)

Zona	Tipo de terreno	Coefficientes $C_i$
A	Tipo I: roca compacta, suelo cementado o granular muy denso. $V_s > 750\text{m/s}$	1.0
B	Tipo II: roca muy fracturada, suelo granular denso o cohesivo duro $400\text{m/s} < V_s < 750\text{m/s}$	1.3
C	Tipo III: suelo granular de compactación media o suelo cohesivo de consistencia firme a muy firme $200\text{m/s} < V_s < 400\text{m/s}$	1.6
D	Tipo IV: suelo granular suelto o suelo cohesivo blando $V_s < 200\text{m/s}$	2.0

A partir de este coeficiente, Clavero y Ramos (2005), obtuvieron una primera microzonación de la ciudad de Málaga, dividiéndola en cuatro clases de suelo (figura 4.2a). La influencia de la topografía se incluyó a partir del factor de amplificación por topografía definido en el Eurocode 8, ya que el coeficiente  $C$  no tiene en cuenta dicho efecto (Clavero y Ramos, 2005; Clavero, 2007).

A partir de esta microzonación, Macau (2008) trazó un mapa de peligrosidad sísmica local de toda la ciudad. En términos de amplificaciones de intensidad, la microzonación obtenida por Macau (2008), se muestra en la figura 4.2b.

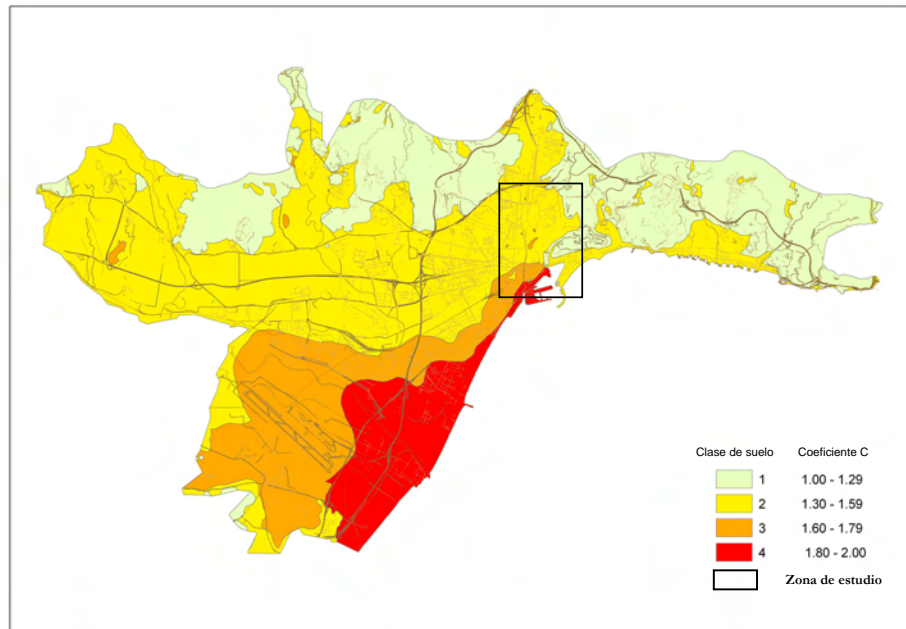


Figura 4.2a. Microzonación sísmica de la ciudad de Málaga en función del coeficiente C (Clavero y Ramos, 2005) . El recuadro señala la zona centro de Málaga de este estudio

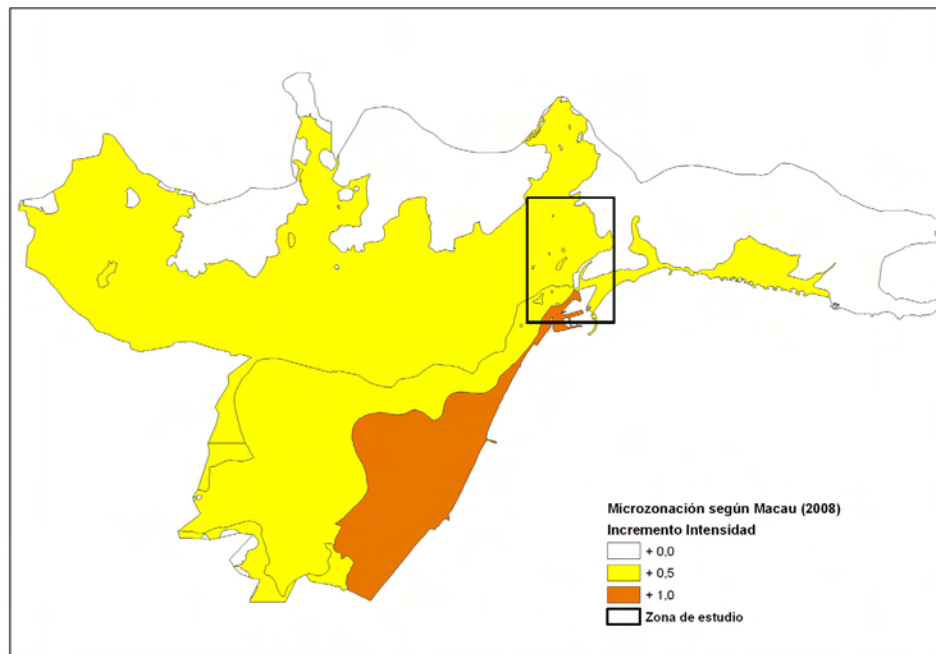


Figura 4.2b. Microzonación de todo el distrito de Málaga en términos de amplificación de intensidad macrosísmica obtenida por Macau (2008). El recuadro señala la zona centro de Málaga de este estudio

Partiendo de la base de esta microzonación (figuras 4.2a y 4.2b), se ha estudiado en detalle la zona centro de la ciudad, realizando una nueva microzonación de la misma. Para ello se han aplicado dos técnicas diferentes, ya descritas en el capítulo anterior: el método del cociente espectral de Nakamura y el método numérico 1D lineal equivalente. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

## **4.2. Método del cociente espectral H/V**

### **4.2.1. Campaña de medidas de ruido sísmico en Málaga**

Para la obtención de las medidas de ruido sísmico, en junio de 2005 se realizó una campaña en la ciudad de Málaga. Se tomaron datos en 74 emplazamientos distintos distribuidos a lo largo de 6 perfiles, elegidos teniendo en cuenta las diferencias en la geología, geotecnia y topografía, así como en función de la facilidad de acceso a los mismos (figura 4.3). Asimismo, se tomaron medidas en puntos cercanos a los monumentos de Málaga dañados durante el terremoto de 1680 y que existen en la actualidad, para poder utilizar dichas medidas en el estudio de vulnerabilidad de los mismos. Para evitar las perturbaciones debidas a la actividad diurna, la mayoría de las medidas se realizaron de noche.

El equipo utilizado se componía de un sismómetro Lennartz triaxial de 5 segundos y un digitalizador Cityshark. Se tomaron medidas con una razón de muestreo de 100 muestras/s en ventanas de 5 minutos, realizando un mínimo de 3 medidas por emplazamiento (Macau, 2008).

El análisis de la campaña en su totalidad y la obtención de las frecuencias fundamentales del suelo de todos los emplazamientos fue realizado por Macau (2008). Se obtuvieron unas frecuencias del suelo entre 0.4 y 4.0 Hz. Los valores menores corresponden a las medidas más cercanas a la desembocadura del Guadalhorce, al suroeste de la ciudad, y coincidiendo con las mayores profundidades del basamento rocoso.

En este estudio se ha procedido a recalcular las medidas de ruido sísmico para los 27 emplazamientos del centro de la ciudad (figura 4.4), a fin de obtener las



frecuencias fundamentales del suelo desde su inicio. Los resultados obtenidos se muestran en el siguiente apartado.

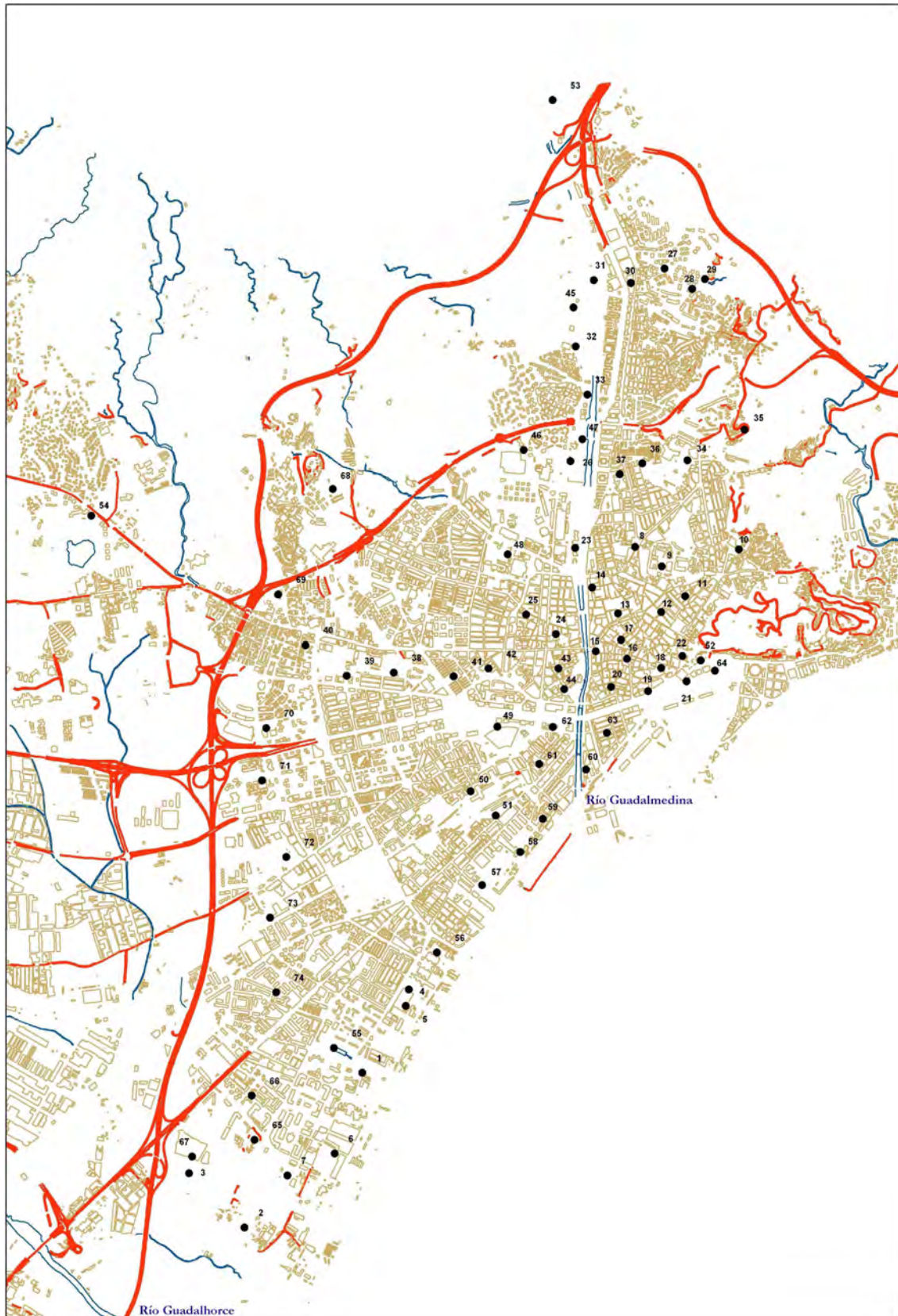


Figura 4.3. Localización de las medidas de ruido sísmico realizadas en la ciudad de Málaga (Macau, 2008)



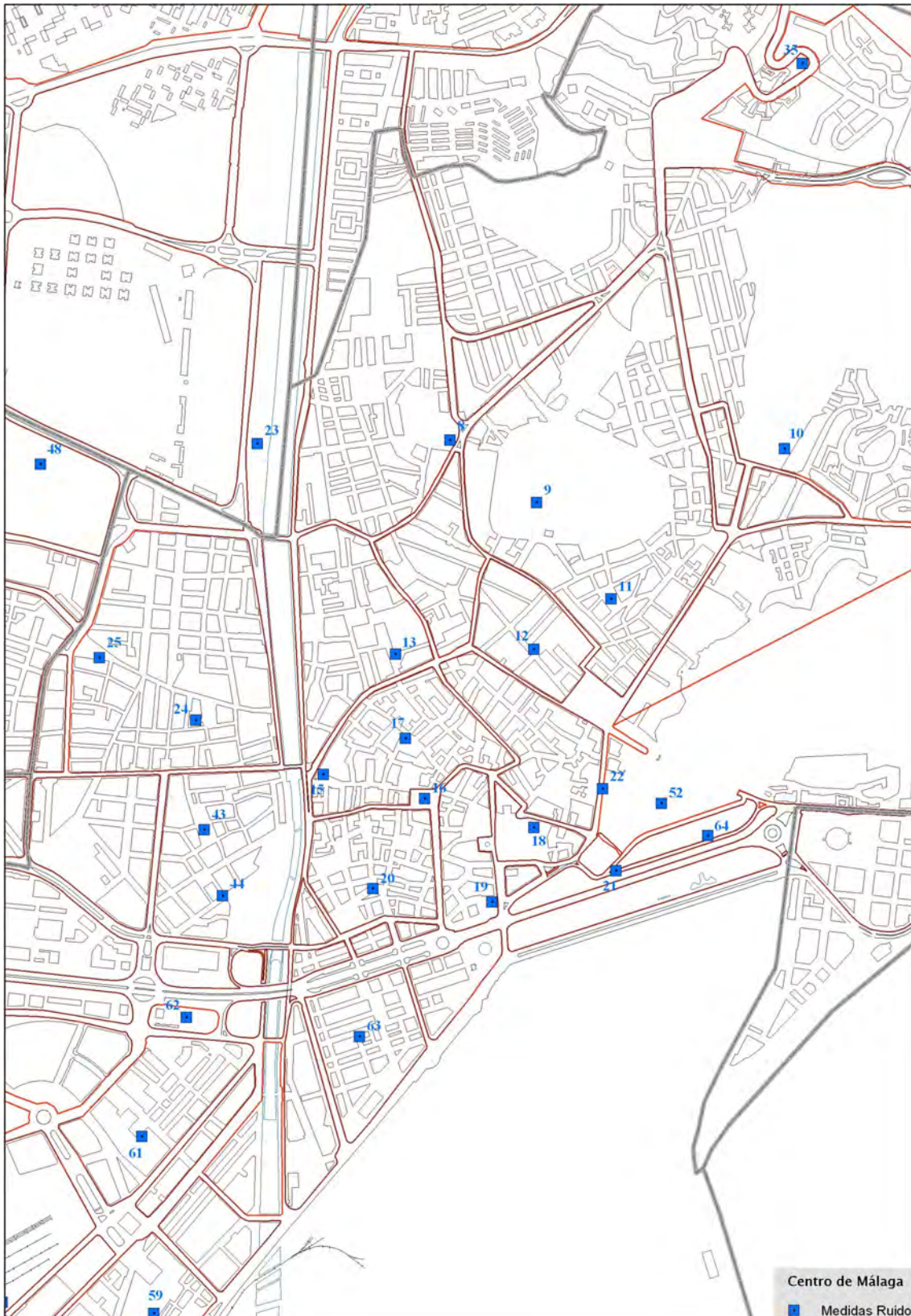


Figura 4.4. Localización de las medidas de ruido sísmico del centro de la ciudad de Málaga utilizadas en este trabajo

#### 4.2.2. Resultados

Utilizando la metodología descrita en el apartado 3.1.3.1, se han obtenido los cocientes espectrales H/V a partir de las medidas de ruido sísmico, así como sus incertidumbres (figura 4.5). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.2, la figura 4.6 y el anexo II. A partir de las incertidumbres de los cocientes espectrales obtenidas, se ha realizado una estimación de las incertidumbres de las frecuencias fundamentales del suelo para dichas medidas.

Tabla 4.2. Frecuencias fundamentales del suelo (Nakamura)

Medida de ruido	Frecuencia fundamental (Hz)
8	$1.20 \pm 0.00$
9	$1.2 \pm 0.3$
10	$4.0 \pm 0.7$
11	$2.0 \pm 0.5$
12	$2.0 \pm 0.3$
13	$1.30 \pm 0.05$
15	$1.10 \pm 0.07$
16	$1.70 \pm 0.05$
17	$1.60 \pm 0.02$
18	$15.00 \pm 0.00$
19	$2.50 \pm 0.05$
20	$2.00 \pm 0.00$
21	$9.0 \pm 0.2$
22	$4.0 \pm 0.3$
23	$1.10 \pm 0.02$
24	$1.00 \pm 0.10$
25	$1.00 \pm 0.02$
35	$10.00 \pm 0.10$
43	$1.10 \pm 0.07$
44	$1.00 \pm 0.10$
48	$1.00 \pm 0.02$
52	$5.00 \pm 0.00$
59	$1.00 \pm 0.02$
61	$1.1 \pm 0.2$
62	$1.1 \pm 0.4$
63	$2.0 \pm 0.3$
64	$25.00 \pm 0.12$

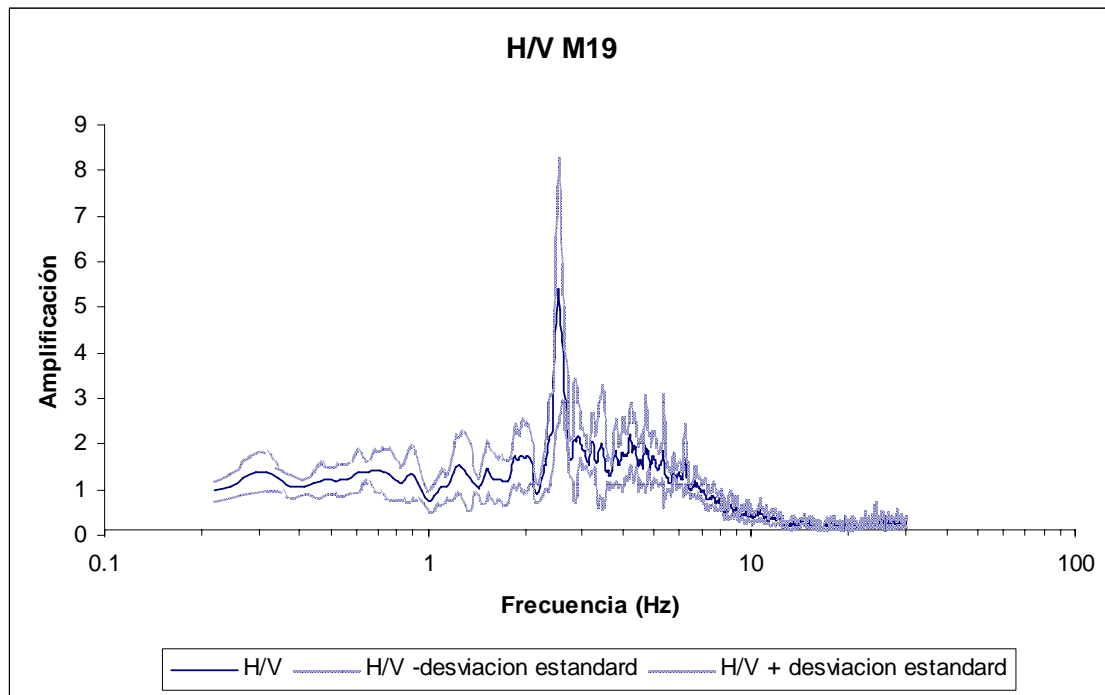


Figura 4.5. Cociente espectral H/V obtenido a partir de la técnica de Nakamura

#### 4.2.3. Conclusiones

Como puede observarse en la tabla 4.2 y la figura 4.6, existe una visible variación regional en las frecuencias fundamentales del centro de Málaga, observándose una clara disminución de las mismas a medida que se desciende desde la colina donde se encuentra la Alcazaba, hacia el oeste, hasta el río Guadalmedina (que discurre de norte a sur). Las frecuencias oscilan entre los 5.0-25.0Hz (en emplazamientos en roca), en la zona este, sobre la colina de la Alcazaba, a valores alrededor de 1.0Hz a ambas orillas del Guadalmedina. Se distingue con claridad una zona intermedia entre la orilla este del río y la colina, con frecuencias fundamentales del orden de 2.0Hz.

De esta forma se puede tener una primera idea de cómo será la microzonación de la zona centro de la ciudad, donde al menos se distinguen tres zonas bien diferenciadas. La microzonación de la zona centro se realizará una vez analizados conjuntamente estos resultados y los obtenidos a partir del programa *ProShake*.



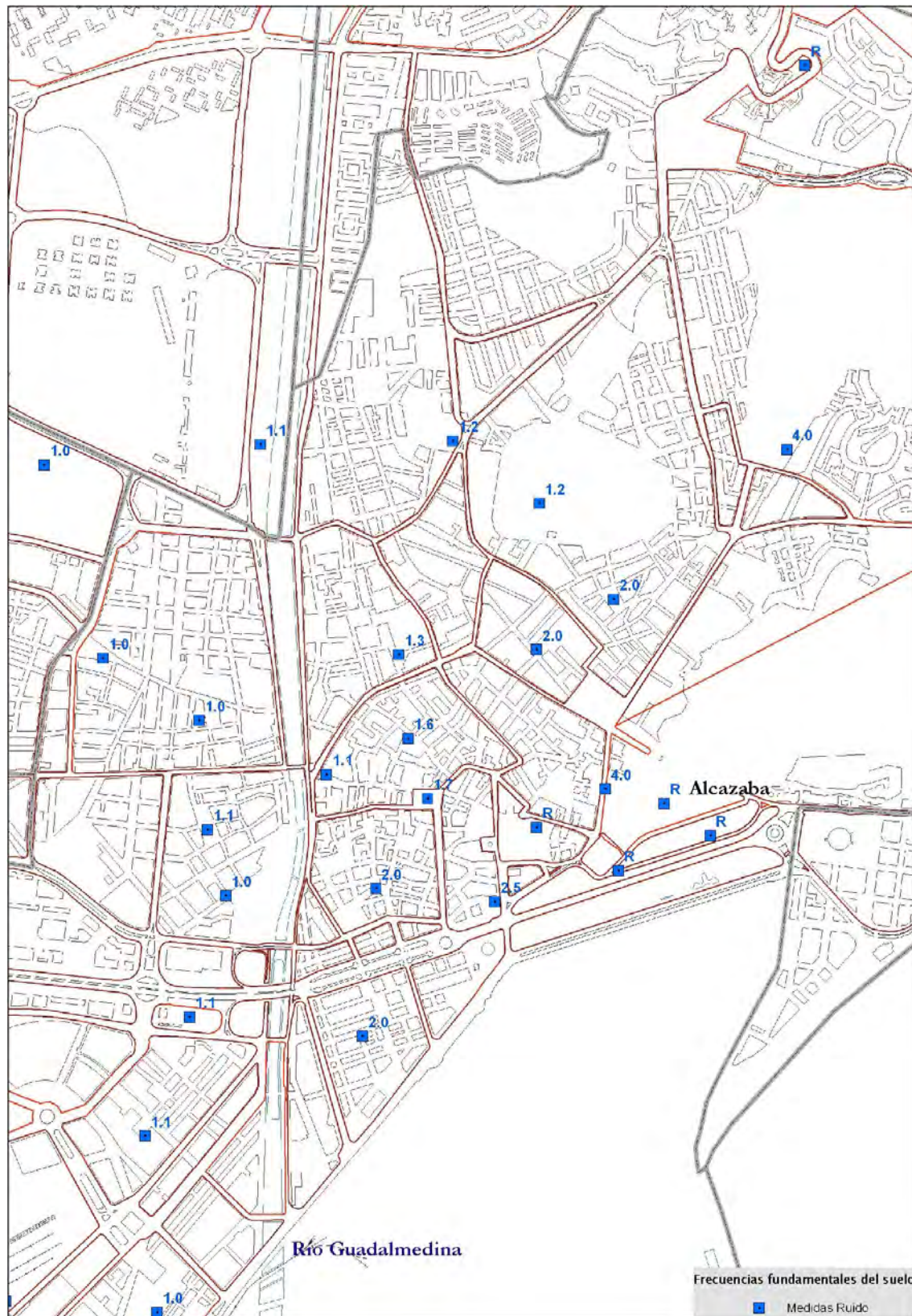


Figura 4.6. Frecuencias fundamentales del suelo (en Hz), en el centro de Málaga obtenidas a partir del método de Nakamura. “R” indica las medidas con frecuencias fundamentales de más de 5.0Hz, consideradas como emplazamientos en roca

### 4.3. Simulación numérica 1D. Método lineal equivalente

#### 4.3.1. Definición de las columnas de suelo

Como ya se explicó en el apartado 3.1.3.2, para aplicar esta metodología es necesario conocer una serie de parámetros geológicos y geotécnicos del suelo en la zona de estudio. Estos parámetros se han tomado de la base de datos geotécnicos de la empresa LIDYCCE (Laboratorio del Instituto de Investigación, Desarrollo y Control de Calidad en la Edificación), creada a partir de la realización de 400 sondeos pertenecientes a 100 estudios geotécnicos en la ciudad de Málaga (LIDYCCE, 2005) (figura 4.7). La información contenida en esta base de datos incluye parámetros tales como los materiales de cada capa y su espesor, la profundidad del nivel freático o los resultados del test SPT para cada una de los sondeos realizados.

En este trabajo se han analizado un total de 48 sondeos del centro de Málaga, correspondientes a 34 columnas de suelo, de las que finalmente se han tomado 27 para el estudio de los efectos locales del suelo. Las 7 columnas no utilizadas han sido rechazadas por su carencia de una completa información geotécnica.

A continuación se definen las columnas de suelo escogidas, extrayendo de la base de datos geotécnica la información necesaria para determinar los parámetros de entrada necesarios en *ProShake*: espesor de cada capa, tipo de material, peso unitario, velocidad de las ondas de cizalla, etc. En la tabla 4.3 se muestra la caracterización de la columna 0a, correspondiente a la zona de roca, como ejemplo. Las descripciones de todas las columnas de suelo utilizadas en este estudio aparecen detalladas en el anexo III. Las curvas de amortiguamiento y variación del módulo de cizalla se han tomado de la base de datos de *ProShake* para cada tipo de material. Se ha tomado una velocidad de las ondas de cizalla de 1500m/s para el basamento rocoso en Málaga, ya que éste se caracteriza por una baja velocidad de cizalla al estar constituido por rocas de baja cohesión (esquistos, conglomerados y areniscas) (Macau, 2008).



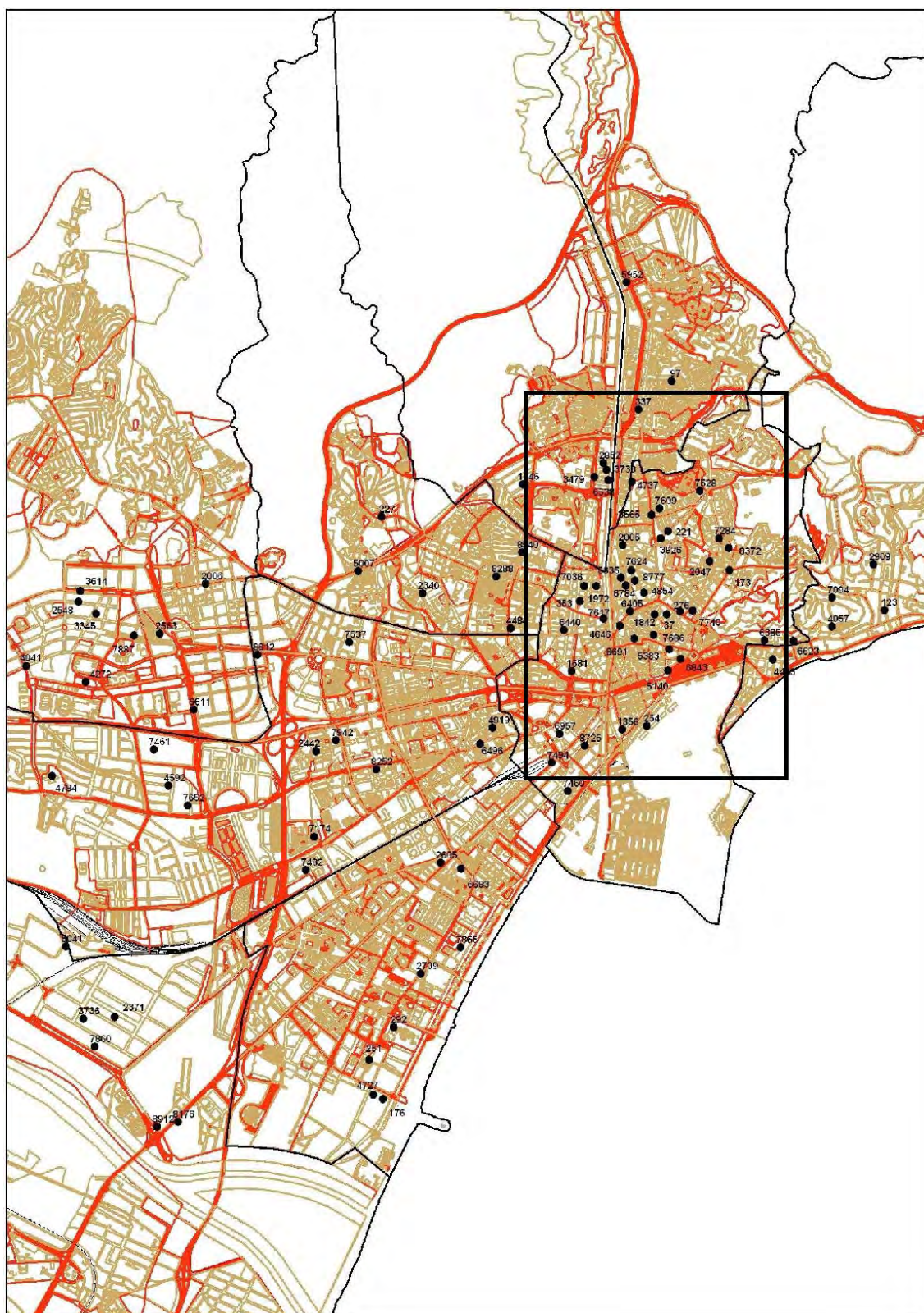


Figura 4.7. Localización de los sondeos geotécnicos realizados en la ciudad de Málaga por la empresa LIDYCCE. El recuadro marca la zona de estudio

Tabla 4.3. Caracterización de las columnas de suelo en el centro de Málaga. Columna 0a (roca)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos antrópicos	3.0	13.3	74.3	234.0	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Debe tenerse en cuenta que los parámetros de cada columna se han tomado hasta la profundidad máxima de cada sondeo, debiendo suponer que el resto de columna hasta llegar al basamento rocoso presenta las mismas características que la capa más profunda sondeada. Cuando la diferencia entre ambas profundidades es muy acusada, se encuentran altos contrastes de cizalla que producen grandes amplificaciones debidas a la falta de información. Para evitarlo, en los casos en que la diferencia entre las profundidades de los sondeos (en nuestro caso hasta los 30m), y las del basamento rocoso (a más de 75m), es de más de 15m, se ha introducido una capa más. Esta nueva capa presenta exactamente las mismas características que la inmediatamente superior, salvo por el valor de la velocidad de cizalla  $V_s$ , que se pretende mejorar para evitar los altos contrastes de cizalla debidos a la falta de información en una parte importante de la capa. Los valores de  $V_s$  para esta “capa ciega” se han tomado de las relaciones realizadas por Hamilton (1971), de velocidades de cizalla para distintos niveles de profundidad en función de cada tipo de material. Se elige el material de la capa superior y se hallan los valores de  $V_s$  cada 5m. Como valor final de la velocidad de cizalla para esta nueva capa, se toma un promedio de todos los valores tomados cada 5m entre el final del sondeo y el basamento rocoso. De esta forma se pretende mejorar los resultados en aquellos sondeos que no se han acercado demasiado al basamento rocoso.

#### 4.3.2. Selección del acelerograma de entrada en roca

En primer lugar, se realizará el estudio de los efectos locales del suelo en el centro de Málaga a partir de un acelerograma tomado de la base de datos *strong-motion* europea.

El acelerograma de entrada en roca escogido para este estudio corresponde a un sismo de magnitud  $m_b=5.4$  (figura 4.8), ocurrido en la zona de Lazio-Abruzzo (Italia), el 5/7/1984, en su componente vertical (Ambraseys *et al.*, 2000). Este registro (que se

denominará “Input Motion 1” o IM1 a partir de ahora), se ha escalado con el valor de PGA propuesto para Málaga en la norma NCSE-02 para un periodo de retorno de 500 años, que es de 0.11g.

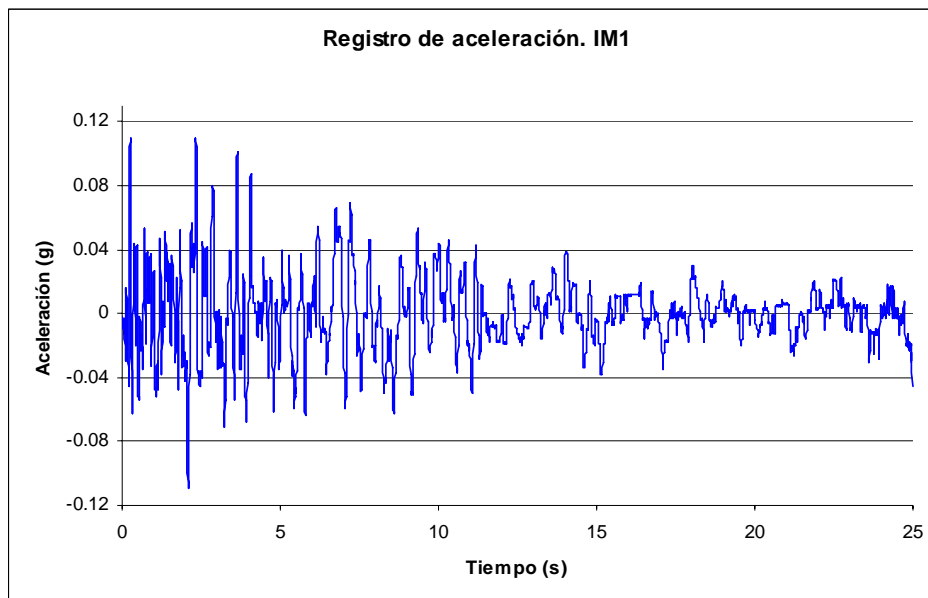


Figura 4.8. Acelerograma IM1 utilizado en este estudio como registro de aceleración en roca en *ProShake*

#### 4.3.3. Resultados

Una vez definidas las columnas de suelo y escogido el acelerograma de entrada en roca, se ha procedido a calcular las funciones de transferencia con el programa *ProShake*, a partir de las cuales se obtienen las frecuencias fundamentales y las amplificaciones del suelo. Por otro lado, se han obtenido las profundidades del basamento en cada columna así como las amplificaciones del suelo en términos de intensidad a partir de la intensidad de Arias, uno de los parámetros de salida del programa. En la figura 4.9 se muestran las frecuencias fundamentales de las columnas de suelo obtenidas con *ProShake* (en negro), junto con las de las medidas de ruido sísmico (en azul), y en la figura 4.10 se muestran las amplificaciones en términos de intensidad para cada una de las columnas. En ambas figuras no aparece ninguna microzonación, para evitar posibles influencias de estudios previos. Con ellas se pretende visualizar a simple vista las zonas con diferente comportamiento sísmico.



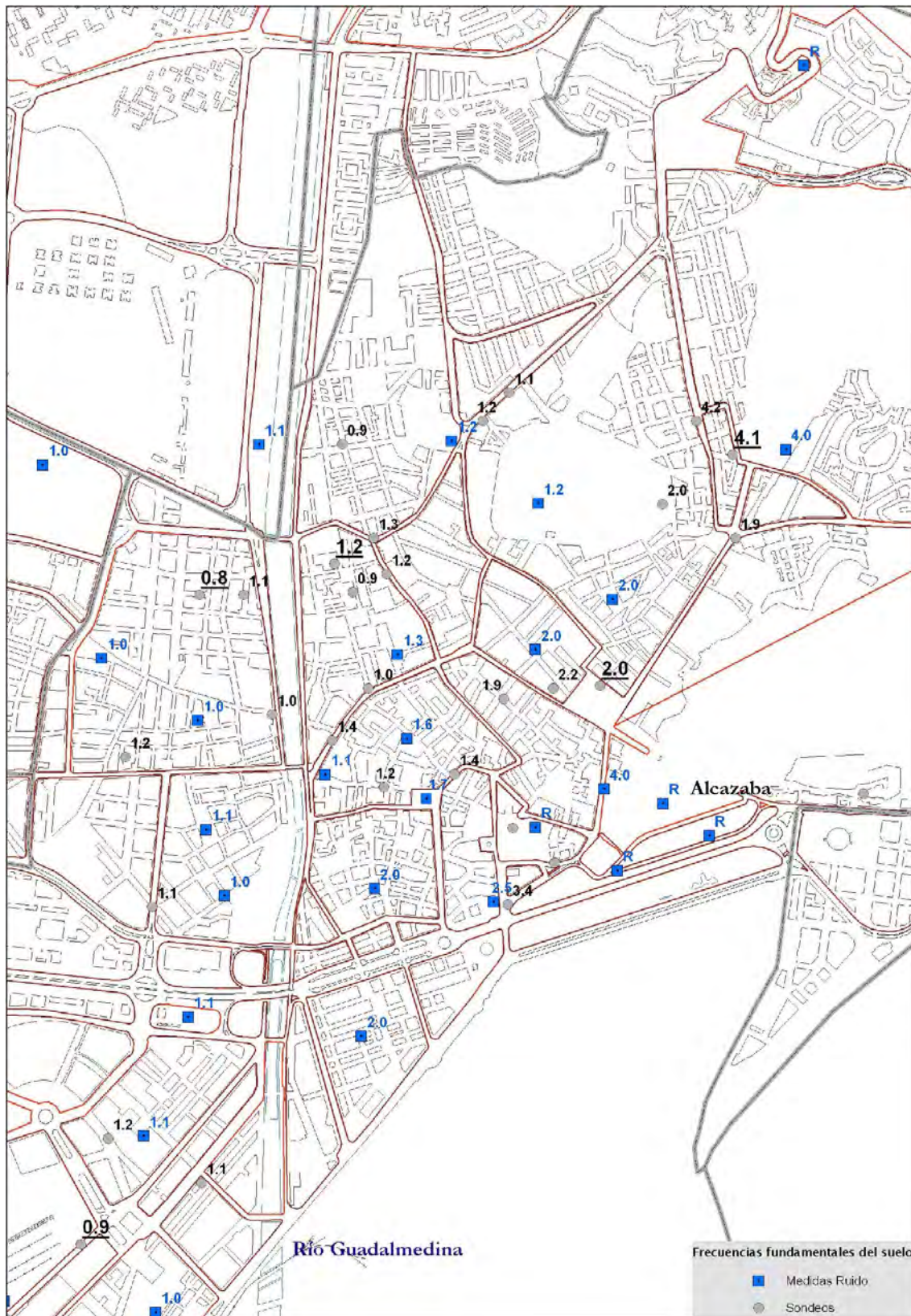


Figura 4.9. Frecuencias fundamentales del suelo obtenidas con Nakamura (en azul), y ProShake (en negro). Los valores subrayados indican los sondes modelo de cada subzona. “R” denota los emplazamientos en roca, con frecuencias mayores de 5.0Hz



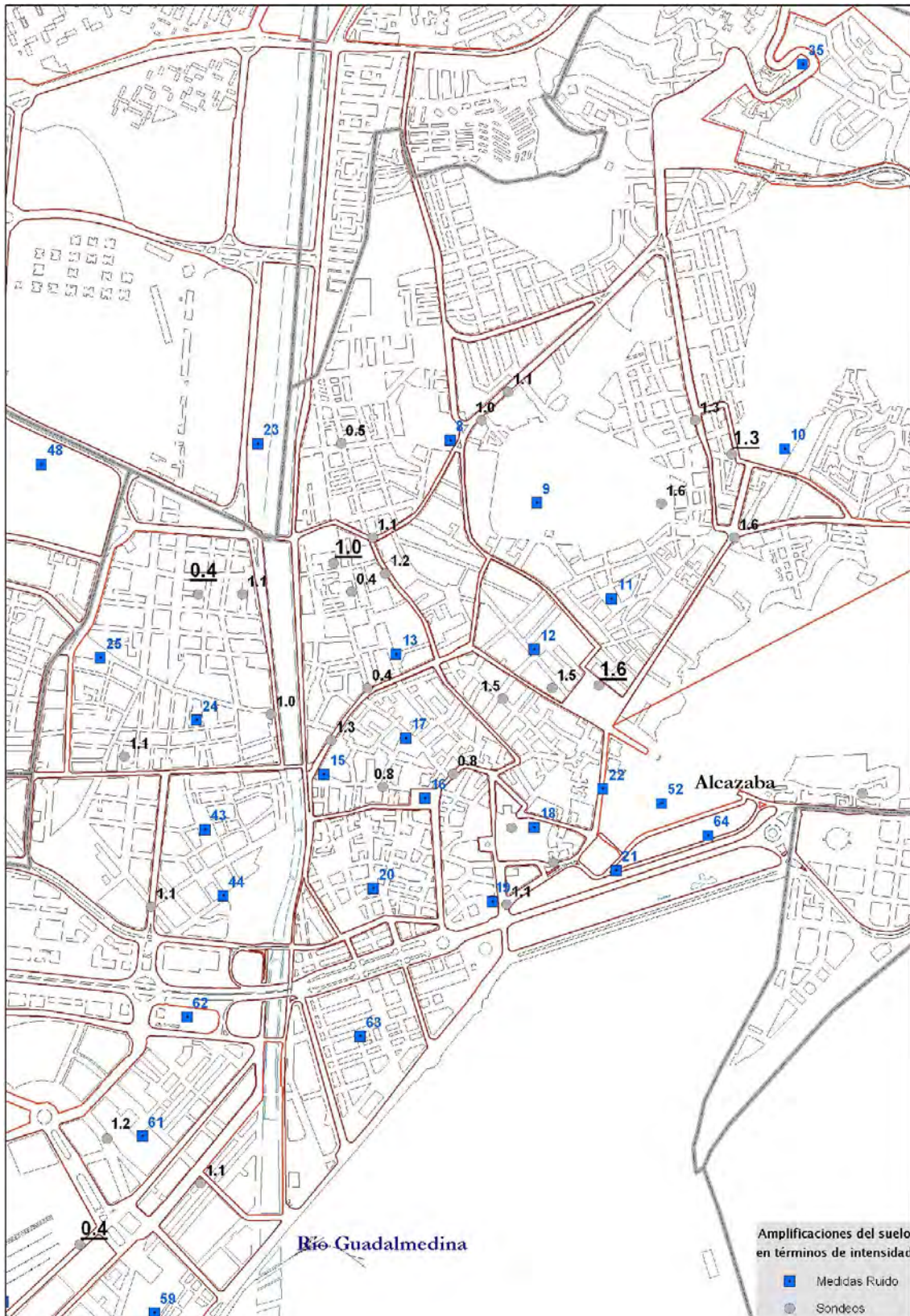


Figura 4.10. Amplificaciones del suelo en términos de intensidad (*ProShake*). Los valores subrayados marcan los sondeos modelo de cada subzona, y los valores en azul corresponden a las medidas de ruido sísmico

Los resultados muestran varias zonas claramente diferenciadas:

- La zona de la Alcazaba (al este), sobre roca, en la que aparecen altas frecuencias ( $>5.0\text{Hz}$ ), y bajas amplificaciones en términos de intensidad (del orden de 0.2). Esta zona se corresponde con la zona A de la microzonación de la ciudad de Clavero y Ramos (2005), dividida en 4 zonas.
- Una pequeña zona al nordeste con frecuencias fundamentales del orden de  $4.0\text{Hz}$  y amplificaciones en términos de intensidad del orden de 1.0.
- Una región que transcurre desde la zona de frecuencias de  $4.0\text{Hz}$  hasta el río Guadalmedina, con orientación nordeste-sudoeste, con frecuencias fundamentales del orden de  $2.0\text{Hz}$  y muy altas amplificaciones en términos de intensidad (del orden de 1.5).
- Una zona al norte de la anterior así como parte de la región al oeste del río Guadalmedina, con frecuencias del orden de  $1.0\text{Hz}$  y amplificaciones en términos de intensidad del orden de 1.0.
- Al oeste de la zona anterior, a medida que nos alejamos de la zona de roca, parece haber al menos tres columnas con frecuencias fundamentales también del orden de  $1.0\text{Hz}$ , pero donde disminuye la amplificación en términos de intensidad a 0.5.

Además, se observa cómo existe un gran acuerdo entre las frecuencias fundamentales obtenidas con Nakamura y *ProShake*.

A partir de los resultados obtenidos, se ha dividido la zona centro en seis subzonas de comportamientos similares. Esta microzonación se ha realizado basándose en primer lugar en las frecuencias fundamentales de las medidas de ruido sísmico obtenidas, que ya marcaban unas regiones bien diferenciadas; en segundo lugar en las frecuencias fundamentales de las columnas de suelo analizadas con *ProShake*. Por último, se han estudiado las amplificaciones del suelo de las funciones de transferencia y en términos de intensidad, así como las profundidades del basamento obtenidas en cada columna. Una vez analizados todos estos parámetros y contrastados con la primera microzonación de la ciudad (realizada a partir de información geológica, geotécnica y



topográfica), se han trazado las subzonas que forman parte de la nueva microzonación del centro de Málaga: las subzonas A, B1, B2, B3, B4 y C (figura 4.11). Puede verse cómo aparece la zona D, que no se considera en este estudio (no hay datos de monumentos históricos en esta zona del casco antiguo), pero que sí fue analizada por Clavero y Ramos (2005), y Macau (2008). Esta zona se mostrará en los mapas de microzonación sísmica por completitud con dichos estudios.

Para cada subzona se ha elegido una columna de suelo como columna-modelo de la misma, de forma que sus parámetros caracterizan a cada una de dichas regiones. Esta elección se ha realizado analizando todos los parámetros involucrados y calculando una función de transferencia promedio de las correspondientes a las columnas de cada una de las zonas. Como columna-modelo para cada subzona se ha tomado aquella cuya función de transferencia es lo más similar posible a la función de transferencia promedio de la subzona. Las funciones de transferencia de cada columna de suelo así como los valores promedio se muestran en el anexo III.

En la tabla 4.4 se muestran los parámetros característicos de cada una de las columnas de suelo así como la subzona de la que forman parte. Las columnas modelo de cada subzona se muestran en negrita. Pueden apreciarse algunas columnas de suelo en la zona A (roca), sin caracterizar. Se trata de emplazamientos en roca aflorante con diferentes espesores de rellenos antrópicos (entre 5.0 y 7.0m) que, dados sus altos contrastes en las velocidades de cizalla con el basamento rocoso, dan como resultado amplificaciones excesivamente elevadas y amplificaciones en intensidad no realistas. Los resultados de estas tres columnas pueden ser, asimismo, debidos a la limitación de *ProShake* cuando trata con perfiles de baja potencia, lo que suele suceder en emplazamientos en roca. Por ello se ha tomado la columna 0a como representativa de la zona A, en su mayoría compuesta por roca aflorante, y que, por tanto, no produce amplificaciones del suelo en términos de intensidad. Se han mantenido, sin embargo, los resultados de la columna 1a, con una frecuencia fundamental muy baja (unos 3.5Hz) y una alta amplificación del suelo (+1.0), que se corresponde con una región de características geológicas anómalas.

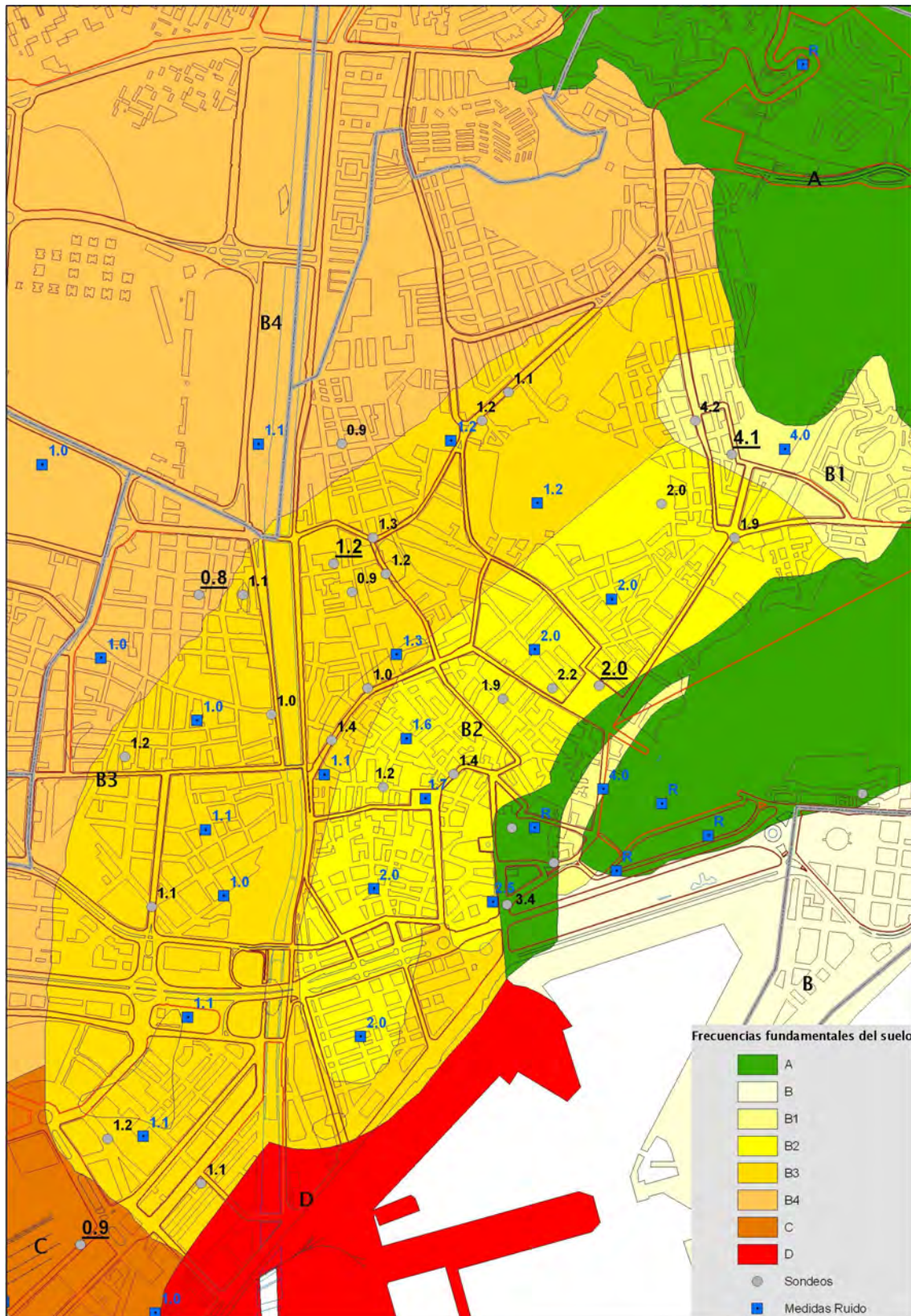


Figura 4.11. Microzonación del centro de Málaga y frecuencias fundamentales de las columnas de suelo (*ProShake*, en negro), y las medidas de ruido sísmico (*Nakamura*, en azul), analizadas en este estudio. Se subrayan las columnas modelo de cada subzona

Tabla 4.4. Frecuencias fundamentales ( $v_{fund}$ ), amplificaciones del suelo y amplificaciones en términos de intensidad ( $\Delta I$ ) de cada una de las columnas estudiadas

Ref.	Nº sondeo	Subzona	$v_{fund}$ (Hz)	Amplificación	$\Delta I$
<b>0a</b>	<b>ROCA</b>	<b>A</b>	<b>18.9</b>	<b>5.90</b>	<b>0.24</b>
1a	5140	A	3.41	4.42	1.07
2a	6385	A	----	----	----
3a	6843	A	----	----	----
4a	5383	A	----	----	----
1b	7284	B1	4.17	6.42	1.29
<b>2b</b>	<b>8372</b>	<b>B1</b>	<b>4.11</b>	<b>6.57</b>	<b>1.30</b>
3b	37	B2	1.85	4.96	1.46
4b	173	B2	1.86	6.04	1.61
5b	276	B2	2.15	5.76	1.45
6b	2047	B2	1.97	6.05	1.63
7b	7686	B2	1.37	3.81	0.79
<b>8b</b>	<b>7740</b>	<b>B2</b>	<b>2.04</b>	<b>6.24</b>	<b>1.60</b>
9b	8691	B2	1.19	4.70	0.81
10b	221	B3	1.07	6.76	1.09
11b	1681	B3	1.11	5.70	1.11
12b	3926	B3	1.15	6.33	1.03
<b>13b</b>	<b>5335</b>	<b>B3</b>	<b>1.15</b>	<b>5.37</b>	<b>1.02</b>
14b	6440	B3	1.15	5.62	1.07
15b	6784	B3	0.85	3.81	0.37
16b	7617	B3	1.04	5.35	0.99
17b	7624	B3	1.26	5.57	1.08
18b	4646	B3	1.43	5.79	1.29
19b	6405	B3	1.01	3.70	0.43
20b	1972	B3	1.07	6.34	1.09
21b	6957	B3	1.18	6.34	1.19
22b	8725	B3	1.07	6.18	1.13
23b	8777	B3	1.22	5.95	1.17
24b	2005	B4	0.91	3.70	0.45
<b>25b</b>	<b>7036</b>	<b>B4</b>	<b>0.79</b>	<b>3.81</b>	<b>0.35</b>
<b>1c</b>	<b>7494</b>	<b>C</b>	<b>0.85</b>	<b>3.80</b>	<b>0.37</b>

En la figura 4.12 se muestran las funciones de transferencia de las columnas modelo de cada subzona. Se observa la buena correlación que existe entre las frecuencias fundamentales de las columnas de suelo obtenidas en *ProShake*, y las de las medidas de ruido más cercanas, analizadas mediante la técnica de Nakamura. Como a partir del método de Nakamura sólo pueden obtenerse las frecuencias fundamentales, y no las amplificaciones del suelo, se ha tomado un valor estándar de 5 para todas las amplificaciones de Nakamura que se muestren en este trabajo. En la tabla 4.5 se muestra un resumen de los parámetros que caracterizan cada una de las subzonas del centro de Málaga, a través de sus columnas modelo.

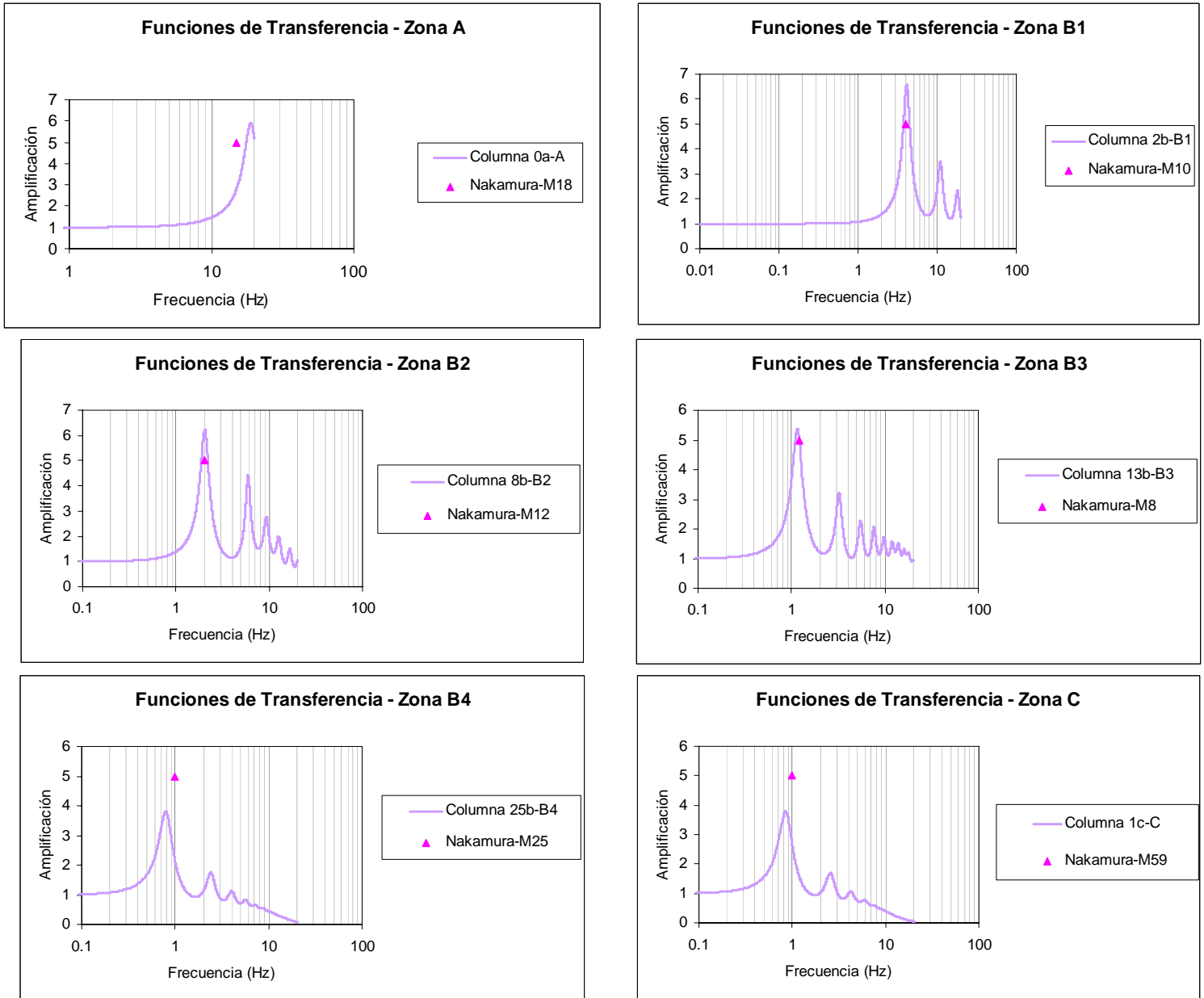


Figura 4.12. Funciones de transferencia de las columnas modelo de cada subzona (obtenidas con *ProShake*), y frecuencias fundamentales (Nakamura) en emplazamientos cercanos a los sondeos geotécnicos

Tabla 4.5. Frecuencias fundamentales, amplificaciones del suelo y amplificaciones en términos de intensidad ( $\Delta I$ ), de las columnas modelo

Ref.	Nº sondeo	Subzona	$v_{fund}$ (Hz)	Amplificación	$\Delta I$
ROCA	ROCA	A	$> 5.0$	5.9	+0.0
2b	8372	B1	$4.11 \pm 0.03$	$6.57 \pm 0.07$	+1.0
8b	7740	B2	$2.04 \pm 0.03$	$6.2 \pm 0.6$	+1.5
13b	5335	B3	$1.15 \pm 0.02$	$5.4 \pm 0.7$	+1.0
25b	7036	B4	$0.84 \pm 0.05$	$3.50 \pm 0.10$	+0.5
1c	7494	C	0.85	3.8	+0.5

Como puede observarse en la tabla 4.5, las zonas A y C de la primera microzonación en 4 zonas de Málaga de Clavero y Ramos (2005), se mantienen de nuevo cada una como una sola zona en el centro de Málaga, sin existir subdivisiones en las mismas. Sin embargo, la zona B sí presenta variaciones en el centro de la ciudad, habiendo claras diferencias entre unas y otras, con frecuencias fundamentales que oscilan entre los 4.0Hz en la zona B1 y alrededor de 1.0Hz en la zona B4, y con amplificaciones en términos de intensidad que varían considerablemente: de +0.5 en la zona B4, a +1.5 en la zona B2.

En las figuras 4.13 a 4.15 se muestra la microzonación realizada en el centro de Málaga en función de las amplificaciones de la función de transferencia (figura 4.13), las amplificaciones en términos de intensidad (figura 4.14), y las profundidades del basamento rocoso (figura 4.15). Por coherencia con la primera microzonación de Málaga (Clavero y Ramos, 2005; figura 4.2a), se ha mantenido la misma escala de colores, apareciendo distintas gamas de colores en las zonas en que se han establecido subzonas en la nueva microzonación de la zona centro.

En las figuras 4.16 y 4.17 se muestran las amplificaciones del suelo y las amplificaciones en intensidad, respectivamente, de las columnas modelo de cada subzona, en función de su frecuencia fundamental. Los mayores valores corresponden a las zonas B1 y B2, especialmente en las amplificaciones en términos de intensidad, donde la zona B2 presenta una amplificación medio grado mayor que la de la zona B3.

En la figura 4.18 se representan todas las funciones de transferencia de las columnas modelo de cada zona, así como las frecuencias fundamentales de Nakamura. En ella se puede apreciar el pico de amplificaciones existente en las zonas B1 y B2, así como la buena correlación existente entre las frecuencias fundamentales de las columnas de suelo obtenidas con *ProShake*, y las correspondientes a las medidas de ruido sísmico más cercanas y halladas mediante la técnica de Nakamura, a excepción de las zonas B4 y C, con diferencias algo mayores entre ambas metodologías, del orden de 0.2Hz.



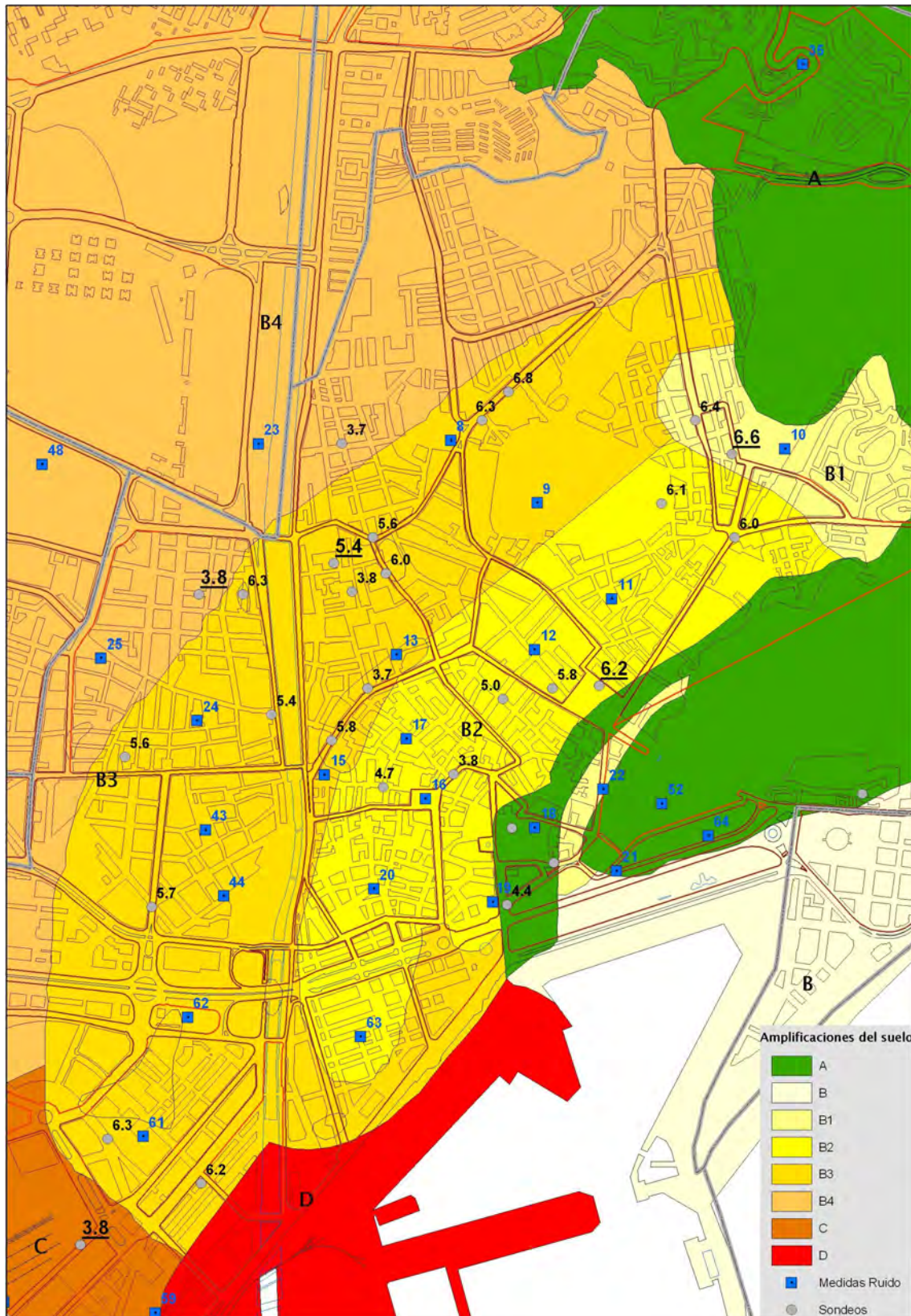


Figura 4.13. Microzonación del centro de Málaga y amplificaciones del suelo (en negro). Los valores en azul corresponden a las medidas de ruido sísmico. Se subrayan las columnas modelo de cada subzona



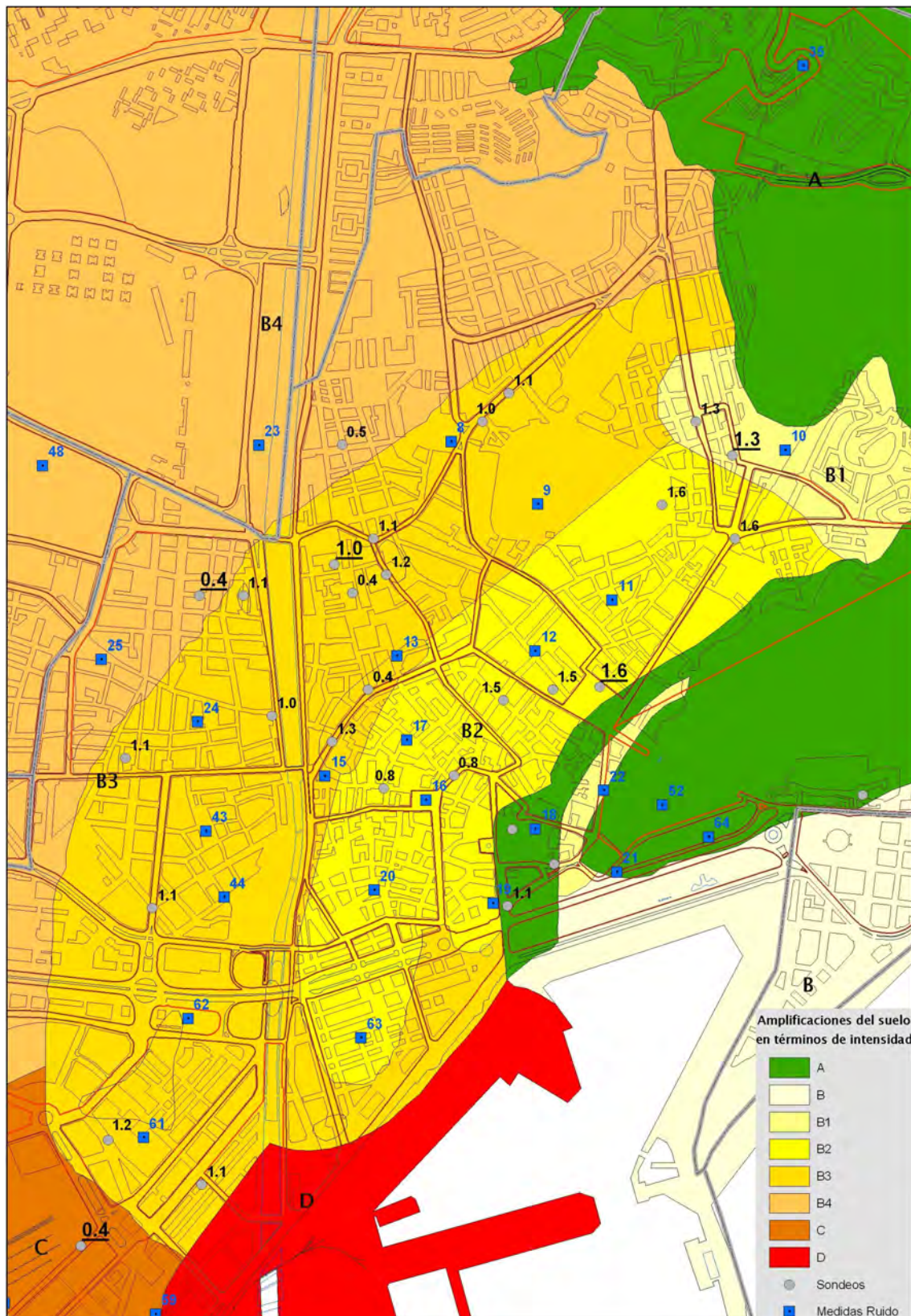


Figura 4.14. Microzonación del centro de Málaga y amplificaciones del suelo en términos de intensidad (en negro). Los valores en azul corresponden a las medidas de ruido sísmico. Se subrayan las columnas modelo de cada subzona



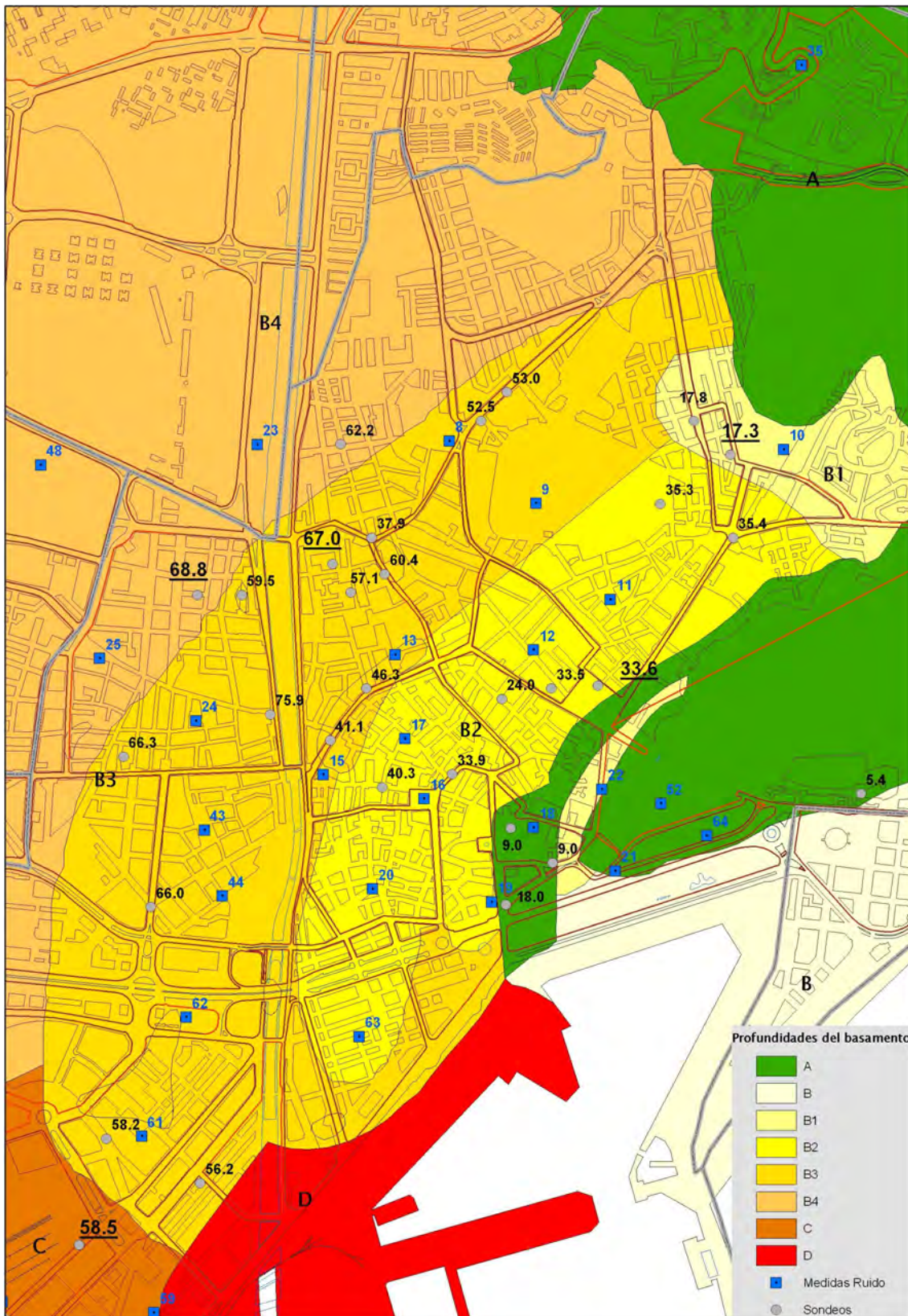


Figura 4.15. Microzonación del centro de Málaga y profundidades del basamento rocoso (en m, en negro). Los valores en azul corresponden a las medidas de ruido sísmico. Se subrayan las columnas modelo de cada subzona



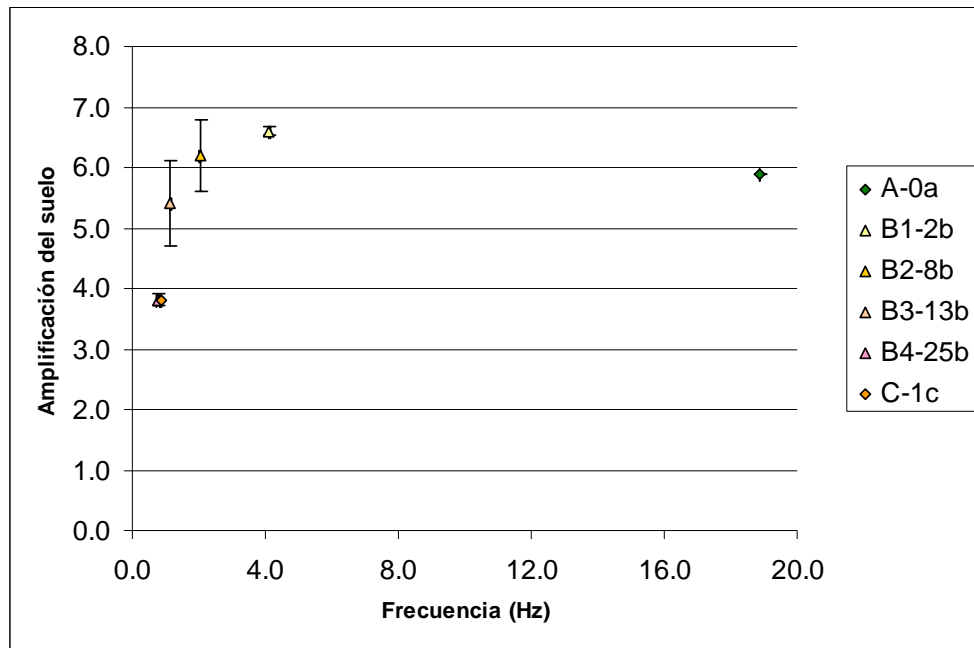


Figura 4.16. Amplificaciones del suelo de las columnas modelo frente a la frecuencia fundamental para la nueva microzonación

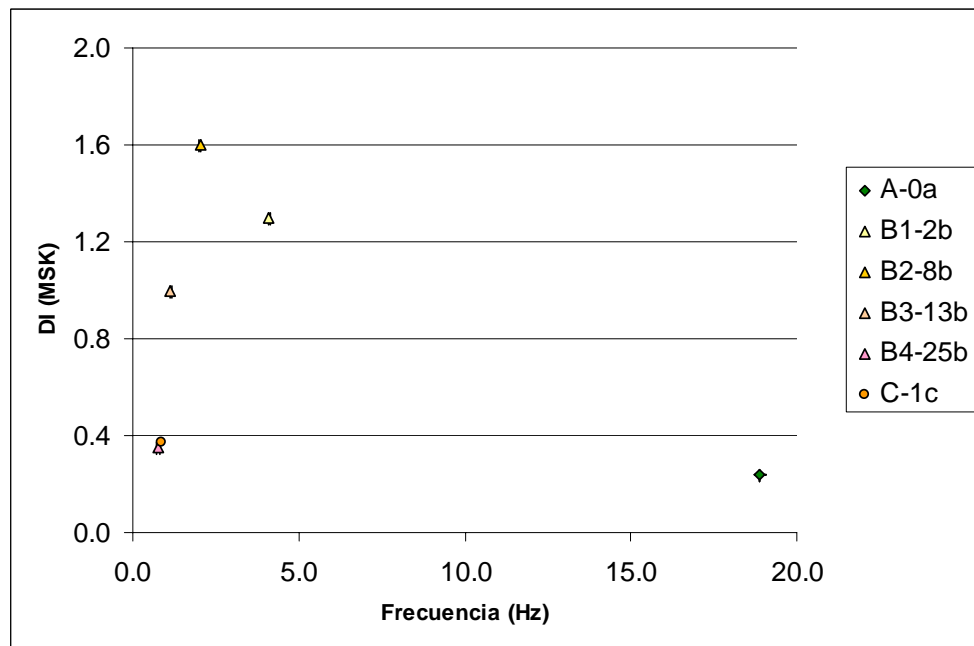


Figura 4.17. Amplificaciones del suelo en términos de intensidad de las columnas modelo frente a la frecuencia fundamental para la nueva microzonación

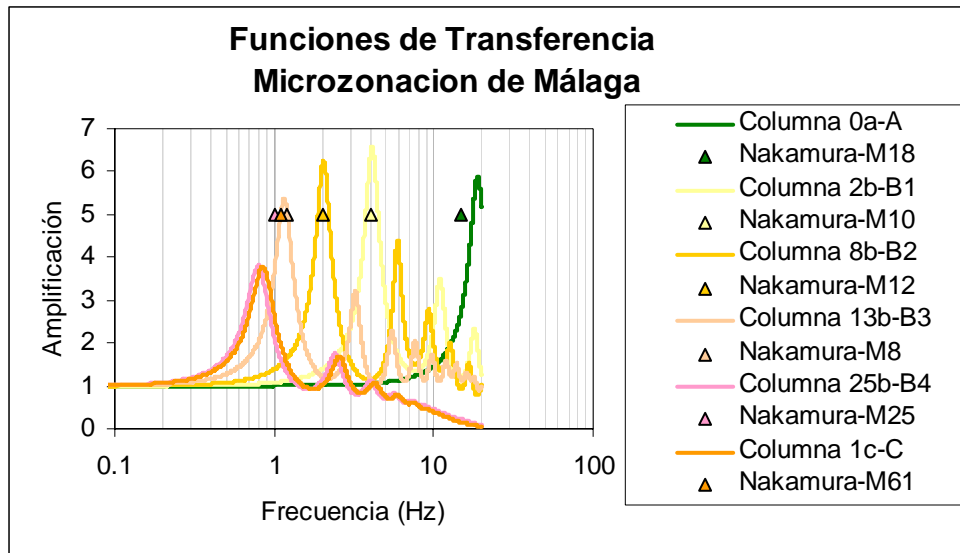


Figura 4.18. Funciones de transferencia de las columnas modelo de cada subzona de la nueva microzonación. Los triángulos corresponden a las frecuencias de Nakamura

En la primera microzonación de la ciudad de Málaga en función del coeficiente  $C$ , realizada por Clavero y Ramos (2005), y caracterizada por Macau (2008), se dividió la ciudad en 4 zonas: desde la zona A, en roca, a la zona D, en las cercanías de la desembocadura del Guadalhorce. La zona A estaba caracterizada por altas frecuencias fundamentales del suelo y nulas amplificaciones del suelo en términos de intensidad. Las zonas B y C, de características similares, se podían describir como regiones con frecuencias fundamentales en torno a 1.0Hz y amplificaciones del suelo en términos de intensidad de +0.5. La zona D, con un basamento rocoso muy profundo (más de 200m), se definía como una región de frecuencias fundamentales del orden de 0.4Hz y amplificaciones en términos de intensidad de +1.0.

Las características básicas de cada una de las subzonas definidas en este estudio, así como su comparación con estudios previos de microzonación en la ciudad, se resumen a continuación:

- En este estudio se han mantenido las zonas A y C como una sola zona, y la zona B se ha subdividido en 4 zonas bien diferenciadas (de la B1 a la B4). Las características de estas zonas se muestran a continuación.
- La zona A, situada en su mayor parte en roca aflorante, se caracteriza por ser una zona de frecuencias fundamentales altas (entre 5.0 y 25.0Hz), que no presenta amplificaciones del suelo en términos de intensidad. La

columna 1a (sondeo 5140), en zona A, constituye un punto singular de características muy distintas al resto: una frecuencia fundamental de 3.4Hz y una amplificación en términos de intensidad de +1.0, excesiva para ser una columna sobre roca. Se trata de una zona situada bajo la calle Bolsa y cercana a la catedral, de singulares características geológicas y geotécnicas aún no conocidas a ciencia cierta. Esta anomalía parece estar relacionada con la existencia de un paleocauce entre la zona de roca de la catedral y la colina de la Alcazaba, así como la de una falla de gran pendiente con un salto de varios centenares de metros en la zona bajo el sondeo 5140. De esta forma, el basamento rocoso desciende bruscamente desde la colina de la Alcazaba hacia el oeste, formando la cuenca sedimentaria conocida como la “Hoya de Málaga”. Sin embargo, por el momento no parece haber acuerdo entre la comunidad científica sobre lo que sucede en esta pequeña zona junto a la Catedral (Daniel y José Luis Clavero, comunicación personal).

- La zona B1 se caracteriza por poseer unas frecuencias fundamentales del orden de 4.0Hz y unas altas amplificaciones del suelo, alrededor de 6.5, así como por unas amplificaciones en términos de intensidad de +1.0. Se trata de una zona pequeña, pero sus diferencias con el resto de zonas (en especial en cuanto a sus frecuencias fundamentales) se han considerado suficientes como para mantenerla como una región diferenciada de las demás.
- La zona B2 presenta frecuencias fundamentales del orden de 2.0Hz, por lo que es una zona de transición entre la zona B1, cercana a la roca, y las zonas B3 y B4, a orillas del Guadalmedina. Es la región que mayores amplificaciones presenta, con unas amplificaciones en términos de intensidad de +1.5. Estas altas amplificaciones se correlacionan con los daños observados en el pasado, pues se trata de la zona en la que los monumentos sufrieron mayores daños en el terremoto de 1680 (ver figura 4.19b).

- La zona B3 se caracteriza por unas frecuencias fundamentales del orden de 1.0Hz y unas amplificaciones del suelo en términos de intensidad de +1.0, al igual que la zona B1.
- La zona B4 presenta una clara diferencia con la zona B3: su frecuencia fundamental ha disminuido a 0.8Hz, su amplificación también ha disminuido considerablemente (de los 5.5-6.0 de B3 a unos 3.7), así como la amplificación en términos de intensidad, que decae a +0.5. Esta zona se corresponde con la zona B de la primera microzonación en términos del coeficiente C, característica de una gran región al oeste del centro de Málaga. Los parámetros obtenidos en este estudio son muy similares a los obtenidos por Macau (2008) para la zona B.
- Las zonas B1, B2 y B3, caracterizadas por amplificaciones muy altas, constituyen zonas de transición entre la roca aflorante de la zona A y la zona B4, característica de la zona B de toda la ciudad, de menores amplificaciones del suelo. Las características de estas “regiones de transición” podrían explicarse por el hecho de que, al presentar una menor capa de sedimentos, aparecen altos contrastes en las velocidades de cizalla entre el suelo y el basamento rocoso, lo que da lugar a altas amplificaciones del suelo. Las características de estas tres regiones no aparecían en la primera microzonación de la ciudad de Málaga, por lo que se pueden considerar la novedad respecto de dicha microzonación, que caracterizan el casco histórico de Málaga, convirtiéndolo en una zona más vulnerable que el resto de la ciudad, especialmente la zona B2, con una amplificación del suelo en términos de intensidad de +1.5. Además, se trata de la zona donde existe una mayor concentración de monumentos de la ciudad.
- Existen algunas columnas con parámetros anómalos dentro de cada una de las zonas (tabla 4.4). Caben destacar en especial tres columnas: las columnas 7b (sondeo 7686,  $\Delta I=0.8$ ) y 9b (8691,  $\Delta I=0.8$ ), en la zona B2, y la columna 15b (6784,  $\Delta I=0.4$ ) de la zona B3, las tres con valores anormalmente bajos tanto de la frecuencia fundamental como de las dos amplificaciones, en contraste con otras columnas cercanas de la misma

zona. La mayoría de las columnas anómalas que se han estudiado presentan un alto porcentaje de gravas en su perfil, de más del 70%. Se trata de perfiles cercanos a pequeñas zonas o “islas” de zona C insertadas dentro de la zona B en la microzonación de Clavero y Ramos (2005), y que no se han mantenido como tales en nuestra microzonación, por no encontrarse variaciones en los parámetros, salvo en estos casos. Estas pequeñas “islas”, sin embargo, aparecen dibujadas en los mapas de microzonación de este estudio (figuras 4.11, 4.13, 4.14, 4.15, 4.19b), para observar su cercanía a los puntos de valores anómalos (la mayoría se encuentran en la subzona B3). La existencia de estas “islas” podría ser debida a que representan zonas de alto contenido en gravas. Por otro lado, las gravas presentan un fuerte decaimiento a altas frecuencias en la curva de variación del módulo de cizalla, mayor que en otro tipo de materiales. Esto causa una desamplificación a altas frecuencias y bajos valores de la amplificación de la función de transferencia. Como consecuencia de este comportamiento, estas columnas presentan bajos valores de la intensidad de Arias, y con ello bajas amplificaciones en términos de intensidad. Conviene hacer constar que los dos sondeos con amplificaciones del suelo en términos de intensidad anormalmente bajas (8691 y 7686) en la zona B2, se encuentran en las cercanías de los monumentos 25 y 30 dañados en el sismo de 1680, y evaluados con un grado de daño 3 (figura 4.19b), siendo unos de los pocos edificios con este grado de daño, en una zona donde predominan los grados de daño 4 y 5, y la zona donde mayor porcentaje de edificios de grados 4 y 5 hubo en Málaga. Esta correspondencia, en una pequeña zona del centro, entre dos de los monumentos con menores daños de la zona y dos columnas de suelo con amplificaciones anormalmente bajas, podría ser debida a numerosos factores, tales como el posible buen estado de conservación de los edificios. Sin embargo, también podría estar indicando la existencia de una pequeña región menos vulnerable que el resto dentro de la subzona B2.

- La zona C presenta parecidos parámetros a los de la zona B4: una frecuencia fundamental del orden de 1.0Hz y una amplificación en términos de intensidad de +0.5, así como una amplificación de 3.8, al igual

que la zona C caracterizada por Macau (2008). Se mantiene como subzona distinta de B4 por las diferencias geológicas y topográficas encontradas por Clavero y Ramos (2005), con respecto de la zona B.

- Se observa una correlación entre la disminución de la frecuencia fundamental del suelo de este a oeste, y el aumento de la profundidad del basamento rocoso, que pasa de unos 5m cerca de la Alcazaba, a unos 60m al oeste del río Guadalmedina.
- Existe un buen ajuste entre las frecuencias fundamentales de las columnas de suelo obtenidas con *ProShake* y las obtenidas a partir de las medidas de ruido sísmico en los emplazamientos más cercanos a las columnas.

A modo de resumen, se muestran en la tabla 4.6 las características básicas de cada una de las subzonas en que se ha dividido el centro de Málaga.

Tabla 4.6. Parámetros característicos de cada una de las subzonas

Subzona	$v_{fund}$ (Hz)	Amplificación	$\Delta I$	$H_{basamento}$ (m)	Tipo de material
A	> 5.0	5.9	0.0	< 9	Maláguide (roca)
B1	4.0	6.5	1.0	17	Cuaternario (rellenos antrópicos, areniscas y conglomerados)
B2	2.0	5.0-6.2	1.5	24-35	Cuaternario (rellenos antrópicos, areniscas y conglomerados)
B3	1.0	5.7-6.8	1.0	55-75	Cuaternario (rellenos antrópicos, areniscas y conglomerados)
B4	1.0	3.75	0.5	60-70	Cuaternario (rellenos antrópicos, areniscas y conglomerados)
C	1.0	3.8	0.5	60	Cuaternario aluvial

En la figura 4.19a se muestra la microzonación del centro de Málaga superpuesta sobre la microzonación de toda la ciudad obtenida por Clavero y Ramos (2005) y Macau (2008). Puede observarse cómo las zonas A, B4 y C de este estudio se corresponden con las clases de suelo 1, 2 y 4, respectivamente, de Macau (2008), siendo las zonas B1, B2 y B3 nuevas respecto de los estudios anteriores.

En la figura 4.19b se realiza una comparación entre los daños observados en los monumentos de Málaga durante el terremoto del 9 de octubre de 1680, y la microzonación realizada en el centro de Málaga. Los monumentos se dividen según su tipología estructural y el grado de daño sufrido (escala EMS-98).

A modo de resumen del estudio de efecto de sitio en Málaga, se muestra en la figura 4.20 la microzonación realizada en el centro de la ciudad en términos de intensidad macrosísmica, que, a efectos de aplicación en estudios de vulnerabilidad, constituye el resultado final del estudio de efectos locales del suelo. En la figura 4.21 se realiza una comparación entre la microzonación de este estudio y la obtenida por Macau (2008), donde puede verse la coherencia entre ambos estudios: la zona de amplificación  $+0.5$  de este estudio constituye la prolongación de la mayor de las regiones del distrito malagueño obtenida por Macau (2008). Por otro lado, la zona costera del sur de la ciudad, presenta la misma amplificación, de  $+1.0$ , que la zona B4 de este trabajo. Sin embargo, se ha encontrado una zona en el centro de la ciudad con las mayores amplificaciones de Málaga, en la transición entre el suelo y la roca.

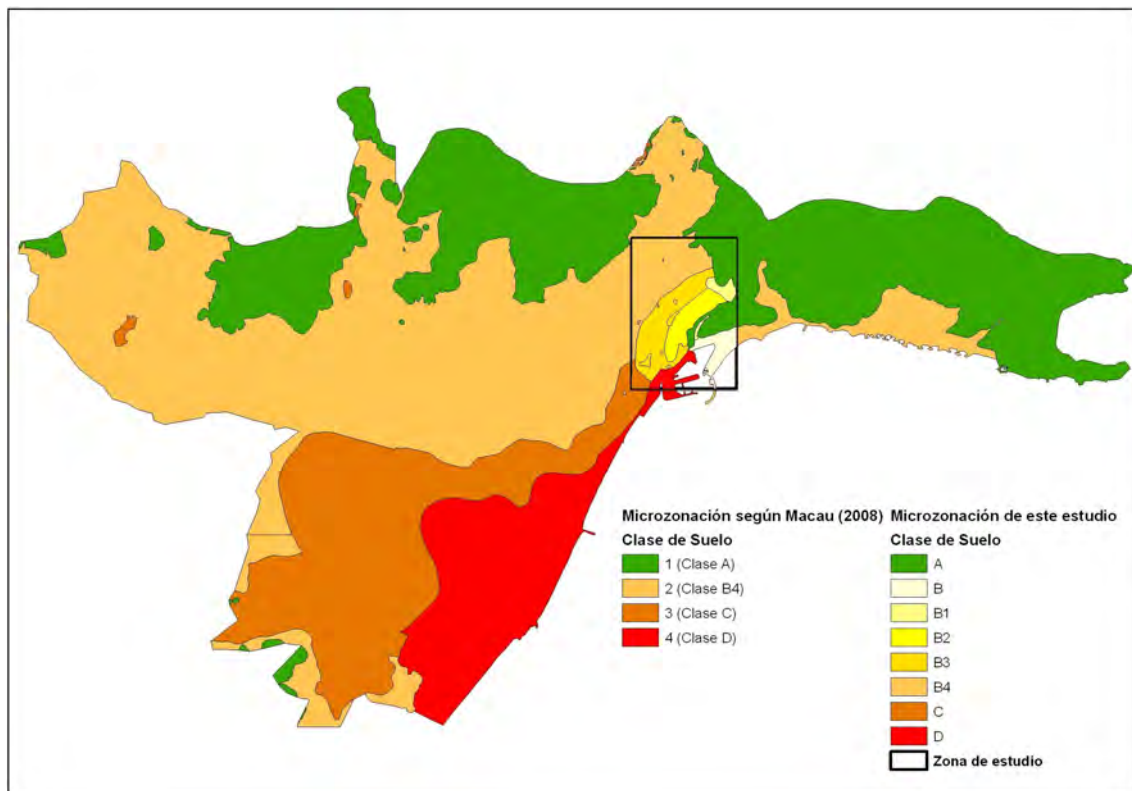


Figura 4.19a. Microzonación del centro de Málaga de este estudio y la de toda la ciudad (Clavero y Ramos, 2005; Macau, 2008)



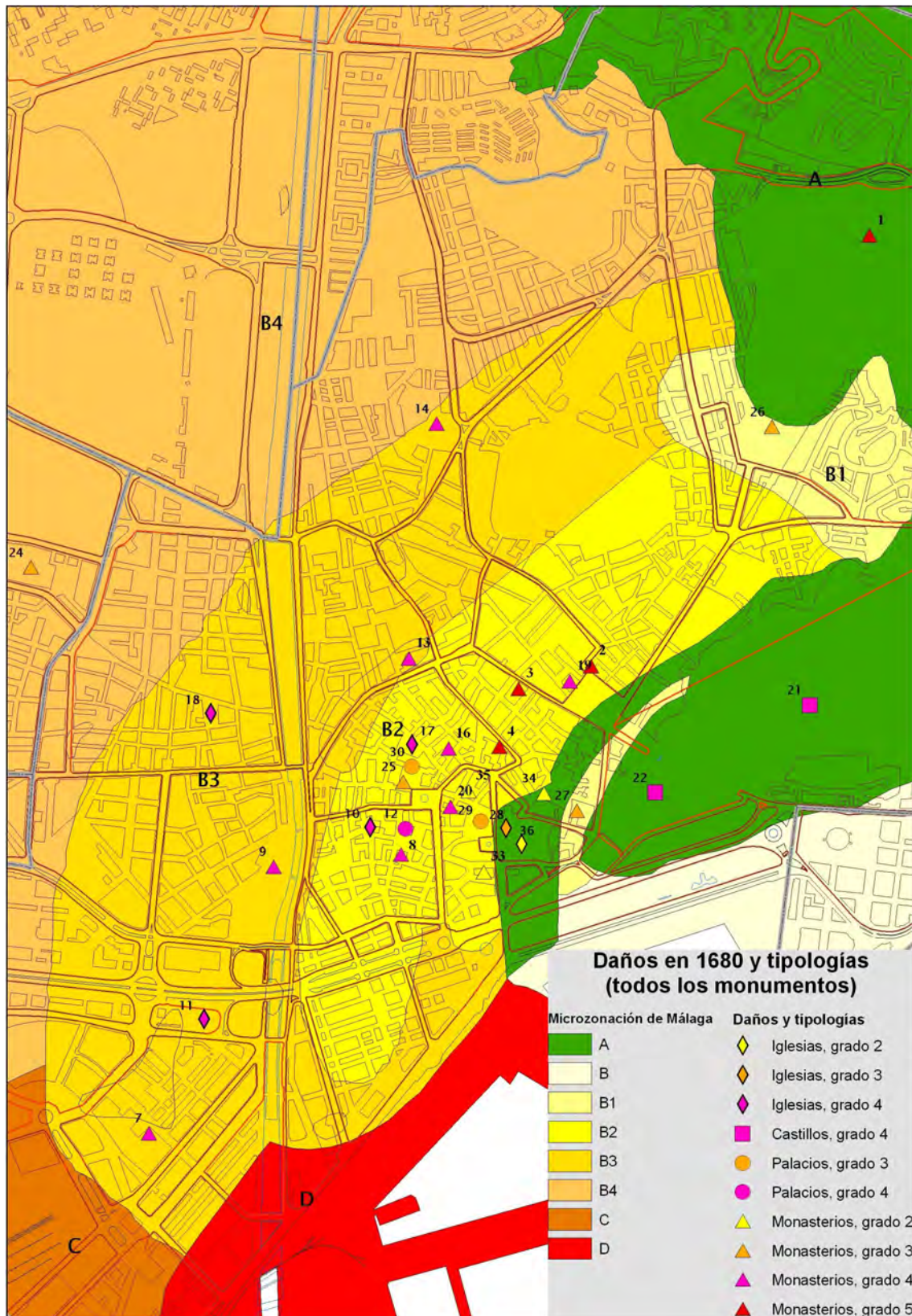


Figura 4.19b. Microzonación del centro de Málaga y grados de daño en los monumentos durante el terremoto de 9/10/1680 (Goded, 2006)



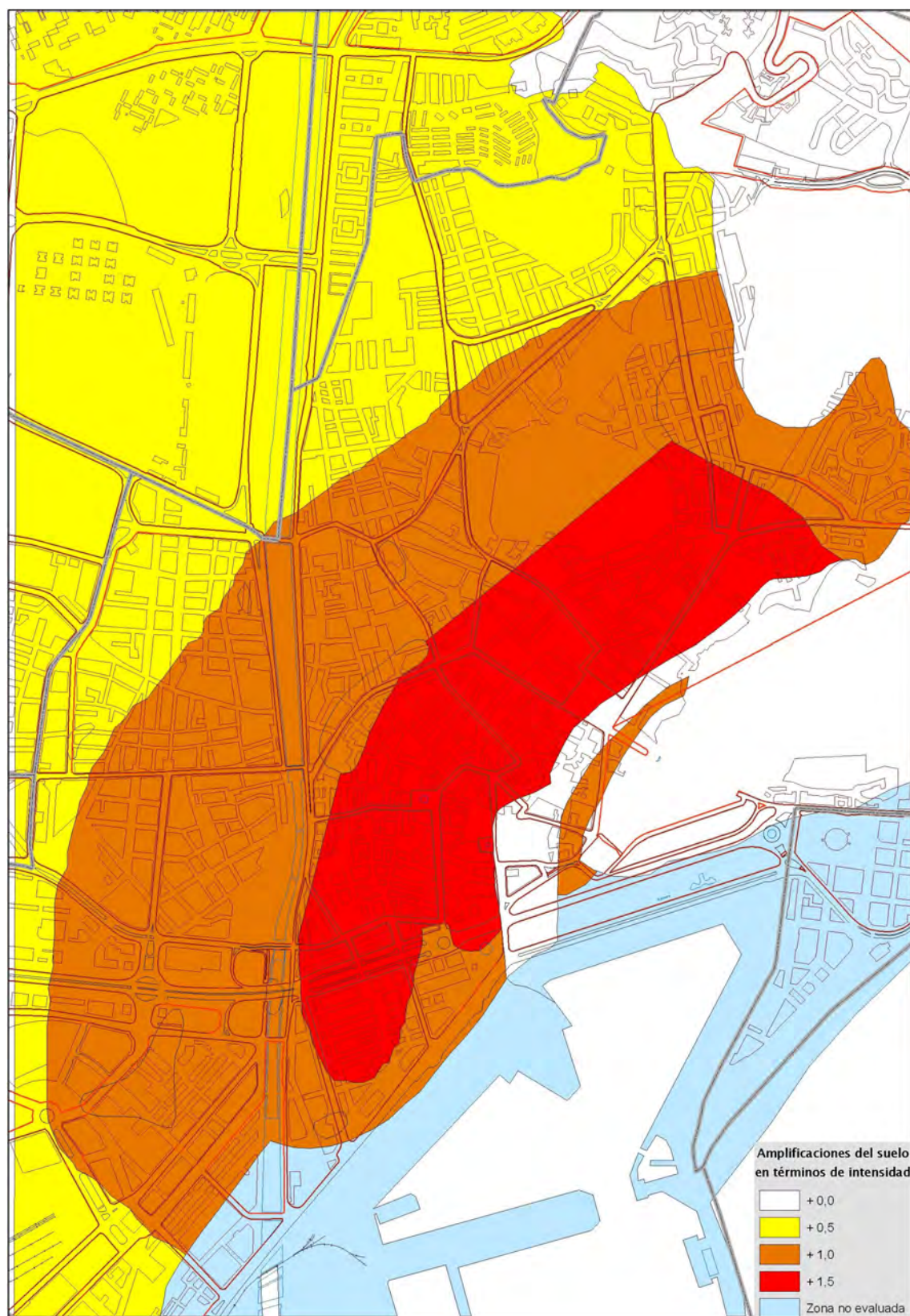


Figura 4.20. Microzonación del centro de Málaga en función de las amplificaciones del suelo en términos de intensidad

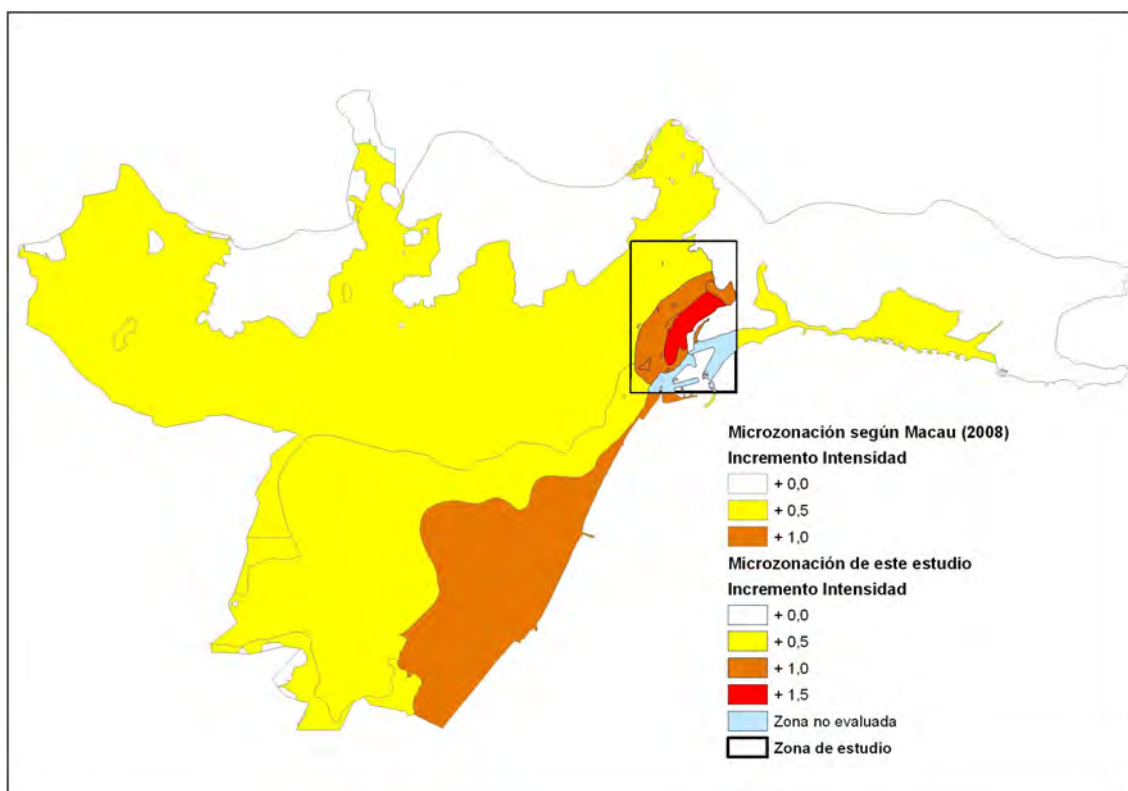


Figura 4.21. Comparación entre la microzonación del centro de Málaga de este estudio y la de todo el distrito de Málaga obtenida por Macau (2008), en términos de amplificación de intensidad macrosísmica

#### 4.3.4. Aplicación al terremoto de 1680

Los resultados de estos efectos locales del suelo se van a utilizar para tratar de simular el terremoto ocurrido en Málaga en octubre de 1680 y comparar los resultados de vulnerabilidad con los daños observados en los monumentos de la ciudad. En las tablas 4.7 y 4.8 se muestra cómo el efecto de sitio afecta a la variación de la intensidad en cada zona. Se considerarán dos microzonaciones: aquella que tiene en cuenta las seis subzonas propuestas (tabla 4.7), y una microzonación simplificada en solo dos tipos de suelos: roca y suelo blando (tabla 4.8). Para obtener las intensidades que afectarían a cada subzona, se asigna al suelo con mayor amplificación (B2), el valor de la intensidad asignada a Málaga en el sismo de 1680, que fue de VIII-IX (Goded et al., 2008a). Para el resto de zonas se resta la amplificación correspondiente (tabla 4.6), de forma que en la roca (sin amplificación), se ha restado la máxima amplificación del suelo. De esta forma se obtienen las intensidades que afectarían a los edificios situados en cada una de las subzonas de la nueva microzonación.

Tabla 4.7. Nueva microzonación del centro de Málaga.  
Aplicación al terremoto de Málaga de 1680

Subzona	Amplificación	$I_{1680}$
A	+0.0	7.5
B1	+1.0	8.5
B2	+1.5	9.0
B3	+1.0	8.5
B4	+0.5	8.0
C	+0.5	8.0

Tabla 4.8. Microzonación de Málaga en 2 tipos de suelos.  
Aplicación al terremoto de Málaga de 1680

Zona	Amplificación	$I_{1680}$
Roca	+0.0	7.5
Suelo	+1.0	8.5

#### 4.3.5. Efectos locales del suelo utilizando registros de aceleración teóricos

Uno de los problemas de este estudio es que no se dispone de registros de aceleración propios para la zona de Málaga. La utilización de un registro de la base europea de movimientos fuertes puede no ser la mejor solución, ya que la sismicidad de la Península Ibérica presenta características muy complejas. Por ello se ha realizado un estudio similar al anterior pero utilizando registros teóricos. Éstos se han generado mediante dos metodologías diferentes: utilizando registros de la zona de terremotos de magnitudes menores como funciones de Green empíricas y generando acelerogramas de mayores magnitudes, y utilizando el método de la discretización del número de onda. En este estudio solamente se utilizarán las columnas modelo de cada subzona. A continuación se describen los resultados obtenidos.

##### 4.3.5.1. Método de las funciones de Green empíricas

Se ha tratado de simular el terremoto de Málaga de octubre de 1680, cuya magnitud se ha estimado en un valor de 7 (Muñoz y Udías, 1988). Se ha utilizado un sismo de profundidad intermedia y magnitud  $m_b=4.1$  ocurrido en 2002 (tabla 4.9) como función de Green empírica, con epicentro a tan sólo 20km de la ciudad (figura 4.22). El

registro de velocidad utilizado (figura 4.23), corresponde a la estación EMAL perteneciente a la red permanente WM (*Western Mediterranean*).

Tabla 4.9. Parámetros focales del sismo de noviembre de 2002  
(Banco de Datos del I.G.N.)

Fecha	Hora	Lat. (°)	Long. (°)	h (km)	m <sub>b</sub>
21/11/02	19:01	36.533	-4.443	91 ± 3	4.1

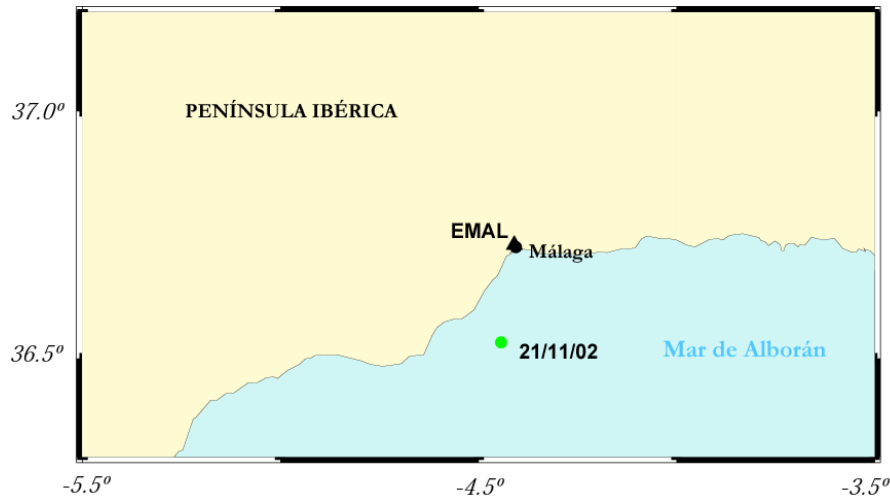


Figura 4.22. Localización de la estación EMAL y el sismo de Málaga utilizado como función de Green empírica

A partir de este registro ( $M_w=4.3$ ), se han generado sismogramas de magnitudes 5.5, 6.5 y 7.0. Como función temporal de la fuente (STF), se ha utilizado un triángulo para generar un terremoto de  $M_w=5.5$ , y fuentes trapezoidales para las magnitudes  $M_w=6.5$  y  $M_w=7.0$  (tabla 4.10).

Tabla 4.10. Características de las STF

$M_w$	STF (s)	Forma STF
5.5	1.0	Triangular
6.5	4.2	Trapezoidal
7.0	7.8	Trapezoidal

Tras generar los sismogramas mediante la convolución de la STF con el sismograma utilizado como función de Green empírica, se ha aplicado un filtro pasabajas a 3.0Hz, correspondiente a la frecuencia esquina de la EGF. Por último, se han derivado los registros de velocidad, obteniendo así los acelerogramas teóricos.

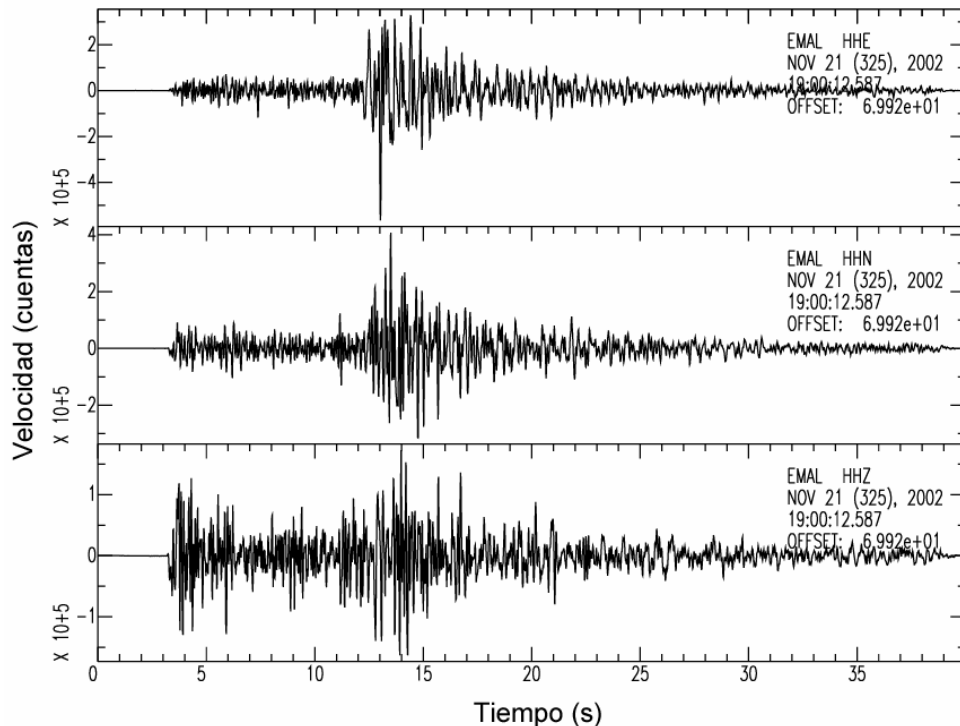


Figura 4.23. Sismograma correspondiente al terremoto de Málaga de 21/11/2002 ( $m_b=4.1$ ,  $h=91\text{km}$ )

En la figura 4.24 se muestra el resultado obtenido para un sismo de magnitud  $M_w=5.5$  a partir del terremoto utilizado como EGF, de magnitud  $M_w=4.3$ , así como la STF utilizada y los espectros de desplazamiento en amplitud del registro teórico (en negro), y la EGF (en rojo). En la figura 4.25 se muestran los registros de aceleración de la función de Green empírica y el registro teórico obtenido. Por último, en la figura 4.26 se muestran las tres componentes del sismograma teórico de magnitud  $M_w=5.5$ . En el anexo IV se muestran los resultados obtenidos para las tres magnitudes consideradas y en sus tres componentes.

Los resultados obtenidos muestran amplitudes teóricas bajas debidas a la pérdida de altas frecuencias, en especial en el caso del acelerograma de magnitud 7.0, donde, a pesar de haber utilizado una fuente trapezoidal, se han perdido las amplitudes de forma notable (figura 4.27). Sin embargo, los resultados para la magnitud de 5.5 son satisfactorios (figura 4.26). En conclusión, se puede generar un acelerograma teórico utilizando uno de menor magnitud como EGF, pero sólo para obtener registros de un terremoto de  $M_w=5.5$ . Los de mayores magnitudes presentan pérdidas de altas frecuencias y amplitudes, lo que hace que esta técnica sea inviable para estudios de efecto de sitio, donde las altas frecuencias son básicas para obtener buenos resultados.



Los resultados podrían ser mejorados aplicando metodologías más sofisticadas que incluyan métodos estocásticos para así evitar la pérdida de altas frecuencias.

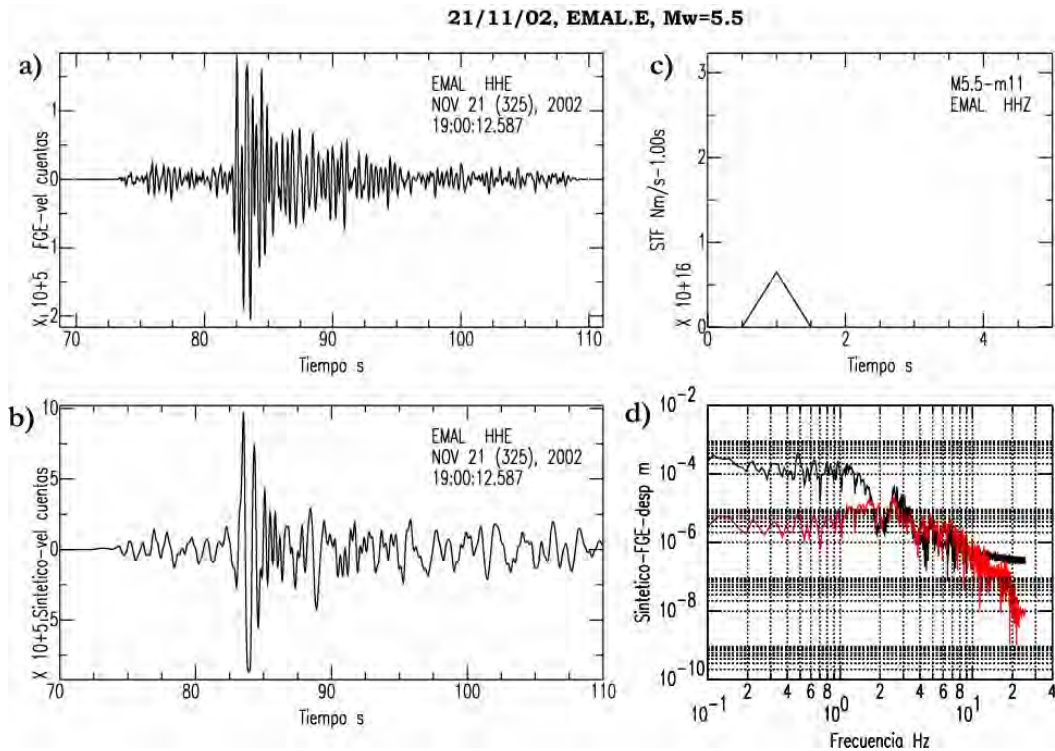


Figura 4.24. Sismograma utilizado como EGF ( $M_w=4.3$ ) (a), sismograma teórico generado para un sismo de  $M_w=5.5$  (b), STF utilizada (c), y espectros de desplazamiento de la EGF (en rojo), y el registro teórico (en negro) (d) (componente este-oeste)

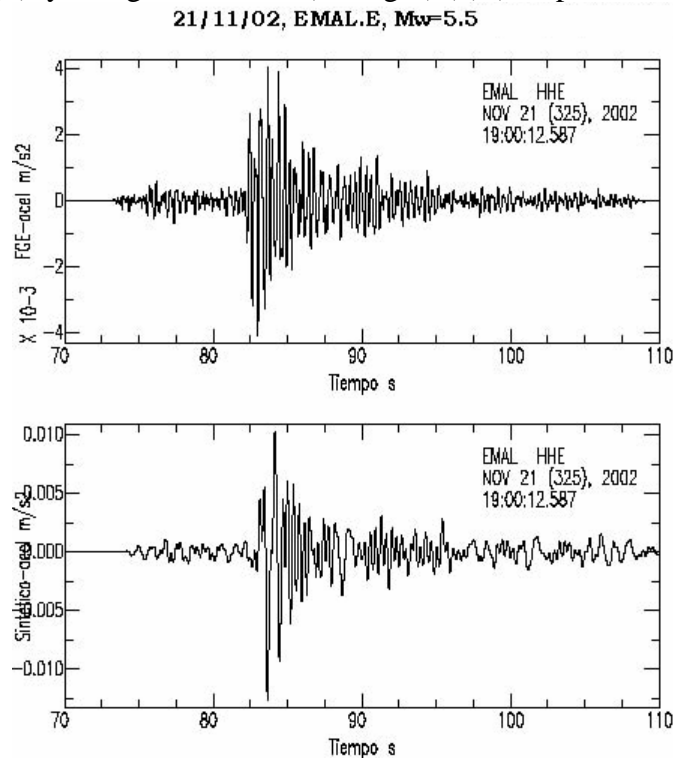


Figura 4.25. Registros de aceleración para la función de Green empírica y el registro teórico de  $M_w=5.5$  (componente este-oeste)

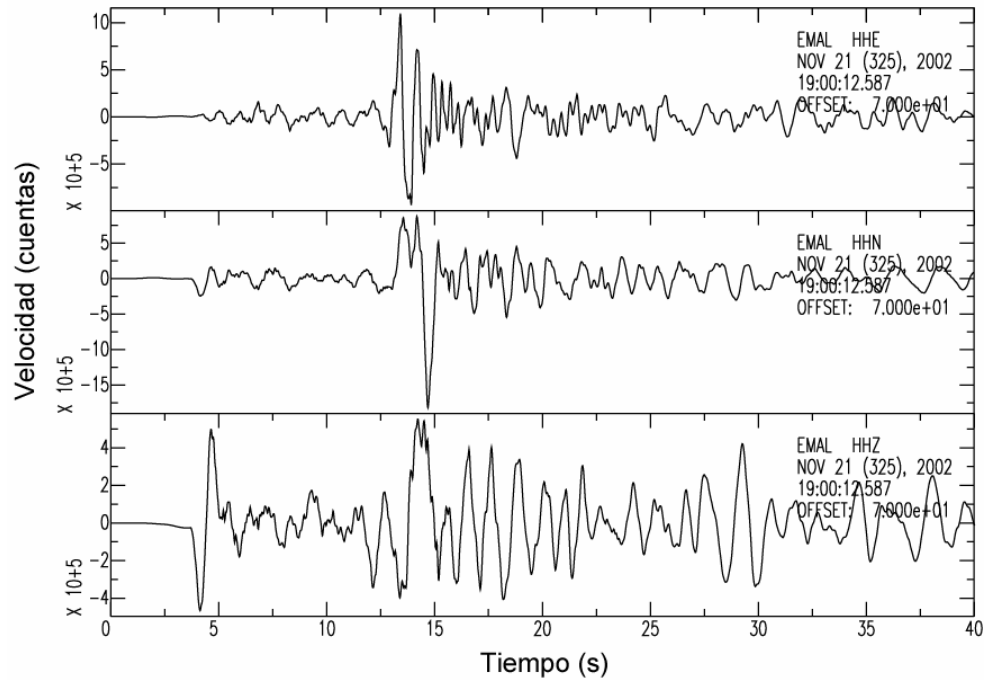


Figura 4.26. Componentes este-oeste, norte-sur y vertical del sismograma teórico de  $M_w=5.5$  obtenido mediante el método de las funciones de Green empíricas

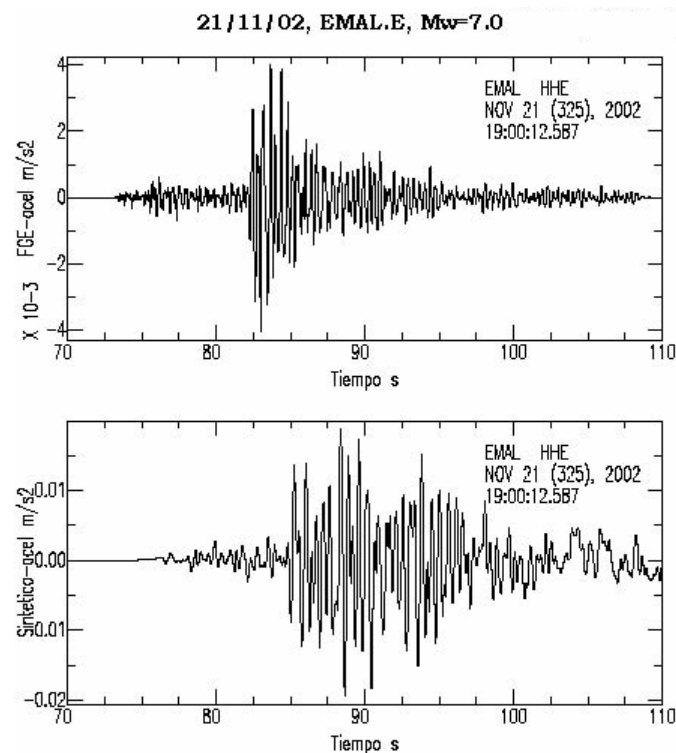


Figura 4.27. Registros de aceleración para la función de Green empírica y el registro teórico de  $M_w=7.0$  (componente este-oeste)

#### 4.3.5.2. Método de la discretización del número de onda

Otra metodología que se ha empleado es la de la generación de sismogramas teóricos mediante el método de la discretización del número de onda (Goded *et al.*, 2008b).

Además del sismo utilizado como EGF en el apartado anterior, se ha utilizado otro terremoto de  $m_b=4.8$  y profundidad intermedia (tabla 4.11).

Tabla 4.11. Parámetros focales del sismo de agosto de 2002  
(Banco de Datos del I.G.N.)

Fecha	Hora	Lat. (°)	Long. (°)	h (km)	$m_b$
24/08/02	10:08	36.415	-4.597	$68 \pm 8$	4.8

Para la generación de los sismogramas teóricos, el primer paso consiste en generar la función de Green. Para ello es necesario disponer de un modelo de corteza adecuado.

#### Modelos de tierra

La región de las Béticas y el mar de Alborán es una zona muy compleja cuya estructura ha sido estudiada por distintos grupos de investigación, por lo que existen varios modelos de tierra específicos para la zona. En este trabajo se han analizado los propuestos por Gallart *et al.* (1995), Dañobeitia *et al.* (1998), Carbonell *et al.* (1998), y Mezcua y Martínez Solares (1983).

Además de estos modelos, se han analizado otros estudios para completar algunos parámetros (tales como las densidades y los factores de calidad): Pujades *et al.* (1990), Caselles *et al.* (1997), Cesca (2005), y los modelos corticales globales PREM (Dziewonski y Anderson, 1981), IASPEI-91 (Kennet y Engdahl, 1991), y el modelo global cortical CRUST2 (Bassin *et al.*, 2000), del que se pueden obtener espesores, densidades y velocidades de las ondas P y S para cualquier punto de la superficie terrestre. Este último modelo es 3D, por lo que no se puede utilizar directamente en el algoritmo de Herrmann, que solamente puede utilizar modelos unidimensionales. Para este modelo se ha tomado un punto de la región de estudio y se han obtenido los parámetros del modelo de tierra como característicos de la zona.



Una vez analizados estos modelos se han elegido cuatro modelos diferentes de tierra (tablas 4.12-4.15), y a partir de ellos se han generado los sismogramas y acelerogramas teóricos para la estación de Málaga (EMAL), y para los dos terremotos intermedios de 2002. Dos de ellos son modelos específicos de las Béticas y el mar de Alborán y dos son modelos más generales, uno de la Península Ibérica y el otro un modelo cortical global. Los modelos seleccionados proporcionan una estructura en forma de capas planas de velocidad constante (figura 4.28):

- 1) Modelo MAL1 (tabla 4.12), para la Península Ibérica (Mezcua y Martínez Solares, 1983), completado con valores de densidades de Cesca (2005).
- 2) Modelo MAL2 (tabla 4.13), para el mar de Alborán (Gallart *et al.*, 1995), completado con valores de densidades del modelo cortical CRUST2 (Bassin *et al.*, 2000).
- 3) Modelo MAL3 (tabla 4.14), tomado de CRUST2 (Bassin *et al.*, 2000), para un punto intermedio entre los epicentros de los tres sismos y las estaciones de registro.
- 4) Modelo MAL4 (tabla 4.15), para la región de las Béticas (Carbonell *et al.*, 1998). Las densidades se han tomado del modelo cortical CRUST2.

Los factores de calidad  $Q_s$  en los cuatro modelos de tierra se han tomado del estudio de ondas de coda en terremotos de la Península de Pujades *et al.* (1990), para la región de las Béticas y el mar de Alborán. Se ha considerado  $Q_p=2*Q_s$ , como recomiendan Caselles *et al.* (1997).

Tabla 4.12. Modelo MAL1 (Península Ibérica)

h (km)	$V_p$ (km/s)	$V_s$ (km/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$Q_p$	$Q_s$
11.00	6.10	3.49	2.75	200.0	100.0
13.00	6.40	3.66	2.80	200.0	100.0
7.00	6.90	3.94	2.90	200.0	100.0
0.00	8.00	4.57	3.33	200.0	100.0

Tabla 4.13. Modelo MAL2 (mar de Alborán)

h (km)	$V_p$ (km/s)	$V_s$ (km/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$Q_p$	$Q_s$
7.00	5.10	2.91	2.70	200.0	100.0
3.00	6.00	3.43	2.90	200.0	100.0
8.00	6.40	3.66	3.10	200.0	100.0
0.00	8.10	4.63	3.40	200.0	100.0

Tabla 4.14. Modelo MAL3 (global CRUST2)

h (km)	V <sub>p</sub> (km/s)	V <sub>s</sub> (km/s)	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	Q <sub>p</sub>	Q <sub>s</sub>
1.00	2.50	1.20	2.10	200.0	100.0
10.00	6.00	3.40	2.70	200.0	100.0
11.00	6.60	3.70	2.90	200.0	100.0
10.00	7.20	4.00	3.10	200.0	100.0
0.00	8.20	4.70	3.40	200.0	100.0

Tabla 4.15. Modelo MAL4 (Béticas)

h (km)	V <sub>p</sub> (km/s)	V <sub>s</sub> (km/s)	ρ (g/cm <sup>3</sup> )	Q <sub>p</sub>	Q <sub>s</sub>
8.00	5.70	3.39	2.70	200.0	100.0
4.00	5.75	3.42	2.70	200.0	100.0
6.00	5.90	3.51	2.90	200.0	100.0
5.00	5.95	3.54	2.90	200.0	100.0
6.00	6.70	3.99	3.10	200.0	100.0
6.00	6.75	4.02	3.10	200.0	100.0
0.00	7.90	4.70	3.40	200.0	100.0

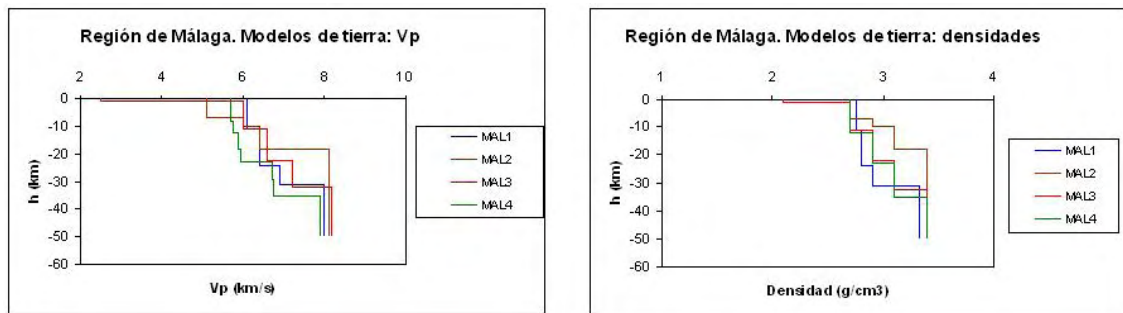


Figura 4.28. Modelos de tierra utilizados en la región de Málaga. Distribución de velocidades a la izquierda y densidades a la derecha

En la figura 4.29 se muestran los epicentros de los sismos de 2002 utilizados así como la localización de la estación EMAL.

Para el terremoto del 24/08/02 se han generado registros para tres profundidades diferentes: 58, 68 y 78km, es decir, la profundidad determinada por el I.G.N. (68km), y dos profundidades con un intervalo de 10km. Una vez obtenidos los resultados para las tres profundidades del foco, se ha tomado el mejor resultado y se ha realizado un segundo test utilizando un rango Δh de profundidades de 1 a 3km. Como STF se ha tomado una delta de Dirac, al ser ésta de tan sólo 0.22s (Fresno, 2004). Asimismo, se ha utilizado un muestreo de 0.10s y los registros se han filtrado aplicando un filtro pasa-

bajas de Butterworth de tercer orden a 0.2Hz. La comparación entre los registros teóricos y observados se ha realizado en desplazamientos.

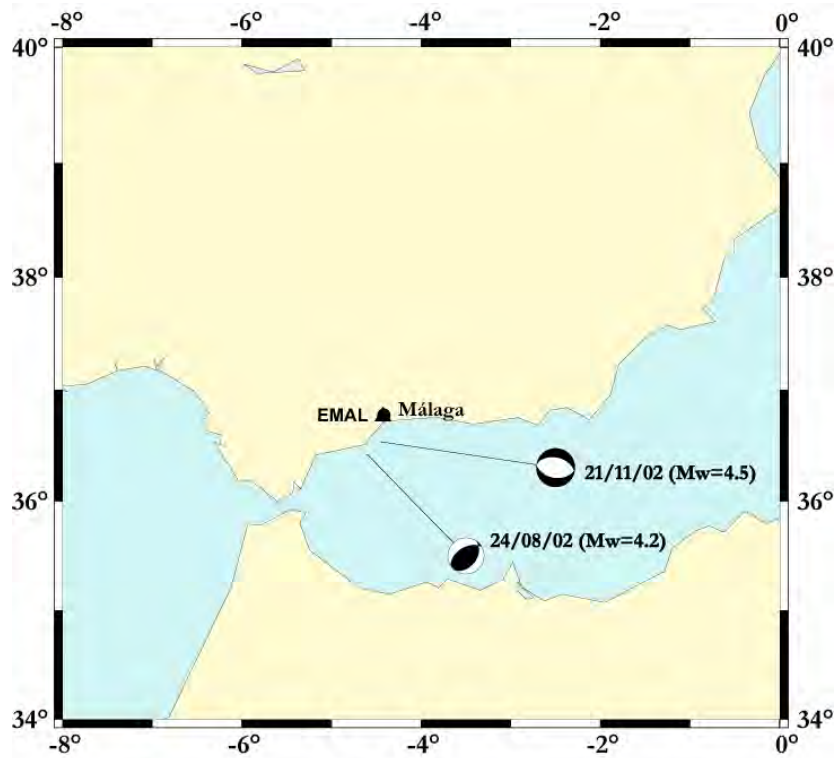


Figura 4.29. Epicentros y mecanismos focales utilizados (Fresno, 2004), y localización de la estación utilizada

Los mejores resultados se han obtenido para una profundidad de 68km (figura 4.30), habiendo pocas diferencias entre los cuatro modelos de tierra utilizados. Sin embargo, el modelo MAL4 parece reproducir algo mejor la forma de ondas. En el anexo V se muestran los resultados obtenidos para la estación de EMAL y las profundidades focales de 58, 68 y 78km.

En el caso del terremoto de 21/11/02, también se ha tomado un muestreo de 0.10s y una delta de Dirac como STF, al ser ésta de 0.24s (Fresno, 2004). Se han generado sismogramas para los cuatro modelos de tierra y tres profundidades distintas: 81, 91 y 101km, mejorados después tomando de nuevo un intervalo  $\Delta h$  de 1 a 3km. Los mejores resultados se han obtenido para los registros teóricos a 93km de profundidad (figura 4.31), observándose tan sólo pequeñas variaciones entre los distintos modelos de tierra. Dada la magnitud del evento, la relación señal/ruido es bastante baja, por lo que

ha sido necesario limitar la comparación a la banda 0.05-0.5 Hz. Los resultados para las 3 profundidades y las tres componentes se muestran en el anexo V.

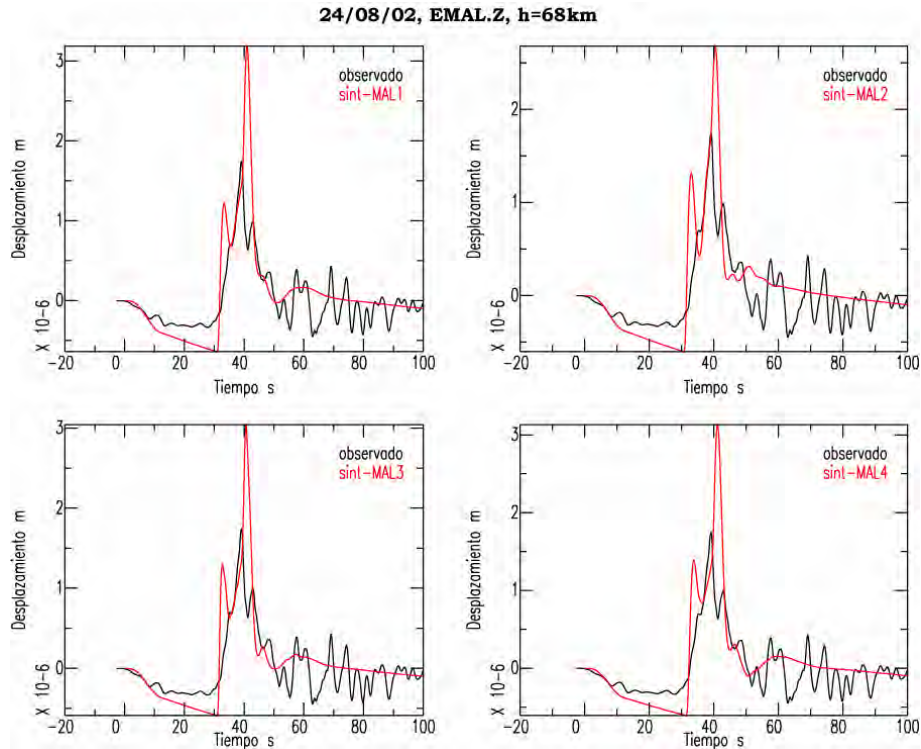


Figura 4.30. Componentes verticales de los desplazamientos observado (negro) y teórico (rojo), para el terremoto del 24/08/02 y la estación de EMAL. Las cuatro figuras corresponden a los cuatro modelos de tierra utilizados

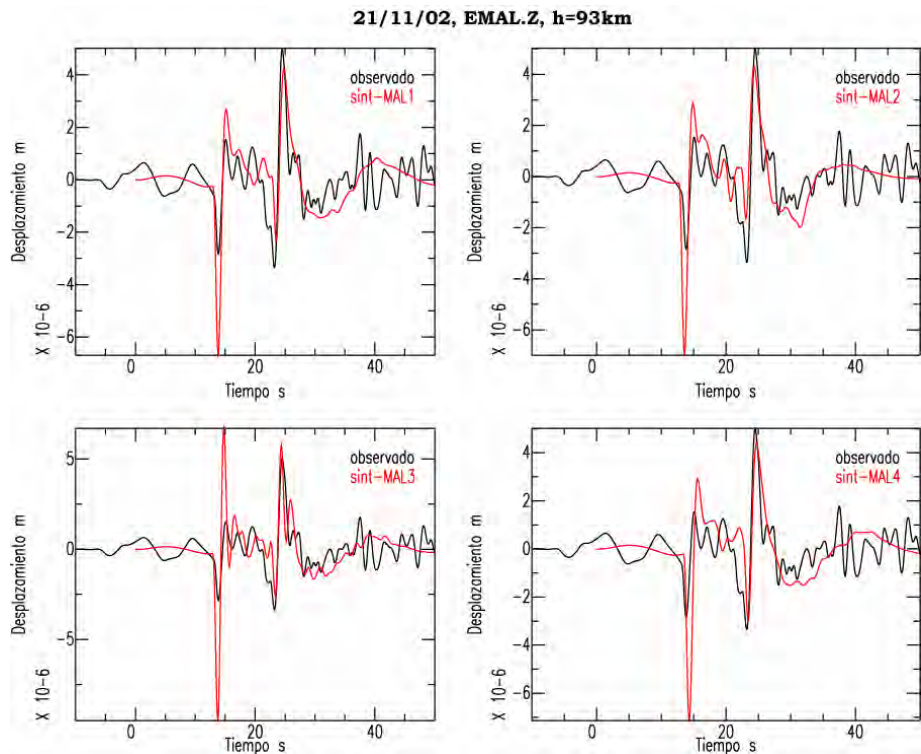


Figura 4.31. Componentes verticales de los desplazamientos observado (negro) y teórico (rojo), para el terremoto del 21/11/02 y la estación de EMAL. Las cuatro figuras corresponden a los cuatro modelos de tierra utilizados

Los resultados obtenidos para los dos sismos intermedios muestran que con esta metodología es posible generar en esta región registros teóricos a bajas frecuencias, reproduciendo bien las amplitudes, lo que no sucedía con el método EGF. Por tanto, se ha utilizado esta metodología para simular el terremoto de Málaga de 1680. Dado que no se conoce el mecanismo focal de este sismo histórico, se han generado dos escenarios sísmicos para él, utilizando los mecanismos focales de los sismos de 24 de agosto y 21 de noviembre de 2002, y unas profundidades focales de 60 y 90km, respectivamente (tabla 4.16). Resulta coherente utilizar estos terremotos a profundidades focales intermedias para simular el sismo de 1680, ya que éste fue asignado con una profundidad de 50km en el estudio realizado por Muñoz y Udías (1988).

Tabla 4.16. Orientaciones de los planos de falla y profundidades de los dos sismos utilizados para simular el terremoto de Málaga de 1680 (Fresno, 2004)

Ref.	Terremoto	Strike (°)	Dip (°)	Slip (°)	h (km)
MF1	24/08/02	37/195	41/51	73/104	60
MF2	21/11/02	97/283	45/45	-94/-94	90

Con estos parámetros, se han generado acelerogramas teóricos para el terremoto de 1680 de magnitudes  $M_w$  de 5.5, 6.5 y 7.0, para la estación de EMAL y el modelo de tierra de las Béticas MAL4 (Carbonell *et al.*, 1998), que, según se ha visto, parece reproducir mejor los resultados para los terremotos de esta región. Como STF, tras analizar diversos trabajos de sismos de parámetros focales similares (Singh *et al.*, 2000; Roumelioti *et al.*, 2003 y 2004), se han tomado los valores mostrados en la tabla 4.17. En todos los casos se han tomado fuentes triangulares y un muestreo de 0.10s, como en los terremotos de 2002. Los acelerogramas se han filtrado con un filtro pasa-bajas a 0.5Hz.

Tabla 4.17. Duraciones de la STF para el terremoto de Málaga de 09/10/1680

Ref.	$M_w$	STF (s)	Forma STF
STF1	5.5	1.0	Triangular
STF2	6.5	4.0	Triangular
STF3	7.0	8.0	Triangular

En las figuras 4.32 y 4.33 se muestran los resultados para la magnitud  $M_w=7.0$  y las profundidades de 60 y 90km, correspondientes a los escenarios propuestos. Los resultados correspondientes a las tres magnitudes para los dos escenarios sísmicos se muestran en el anexo V. Puede observarse que existe una importante pérdida de altas

frecuencias en los resultados. Hay que tener en cuenta que los registros están filtrados en las altas frecuencias, llegando tan sólo hasta 0.5Hz, por lo que ha habido una importante pérdida de las altas amplitudes, aportadas por las altas frecuencias.

Mediante esta metodología se han obtenido resultados bastante satisfactorios para reproducir los registros observados a bajas frecuencias, que podrían utilizarse en estudios de modelización de las formas de onda. Sin embargo, éstos presentan una pérdida de altas frecuencias que lleva como consecuencia la pérdida de amplitudes, vitales en los estudios de efectos locales del suelo. Por ello, esta metodología no resulta ser la adecuada para obtener registros de aceleración en roca con los que se puedan obtener resultados realistas de las amplificaciones del suelo en la ciudad de Málaga.

#### **4.3.6. Comparación de los resultados para distintos acelerogramas**

Una vez obtenidos los acelerogramas teóricos mediante las metodologías de las funciones de Green empíricas y la discretización del número de onda, se trata de ver si alguno de estos acelerogramas podría utilizarse como registros de entrada en roca en *ProShake*, y de esta forma utilizarlos para obtener los efectos locales del suelo en Málaga. Para ello, en primer lugar se obtienen los espectros de respuesta de cada uno de ellos y se comparan con los espectros propuestos por la Norma de Construcción Sismorresistente Española (NCSE-02) para la ciudad de Málaga, así como la del Eurocode 8 (CEN, 2003), tomados como referencia. De entre todos los acelerogramas teóricos generados se han escogido los siguientes:

- a) Base de datos europea de movimientos fuertes ( $M_w=5.4$ ) (figura 4.34a).
- b) Método de las funciones de Green empíricas: se han tomado los acelerogramas de magnitudes  $M_w$  5.5, 6.5 y 7.0 para las componentes este-oeste, al ser las que presentan mayores amplitudes de aceleración (figura 4.34b).
- c) Método de la discretización del número de onda: se han escogido de nuevo las componentes este-oeste (de mayores amplitudes), tomando un sismo de cada una de las tres magnitudes obtenidas, para los dos escenarios de 1680: el de profundidad  $h=60\text{km}$  obtenido a partir del sismo de 24/08/02, y el de  $h=90\text{km}$  (sismo de 21/11/02) (figura 4.34c).

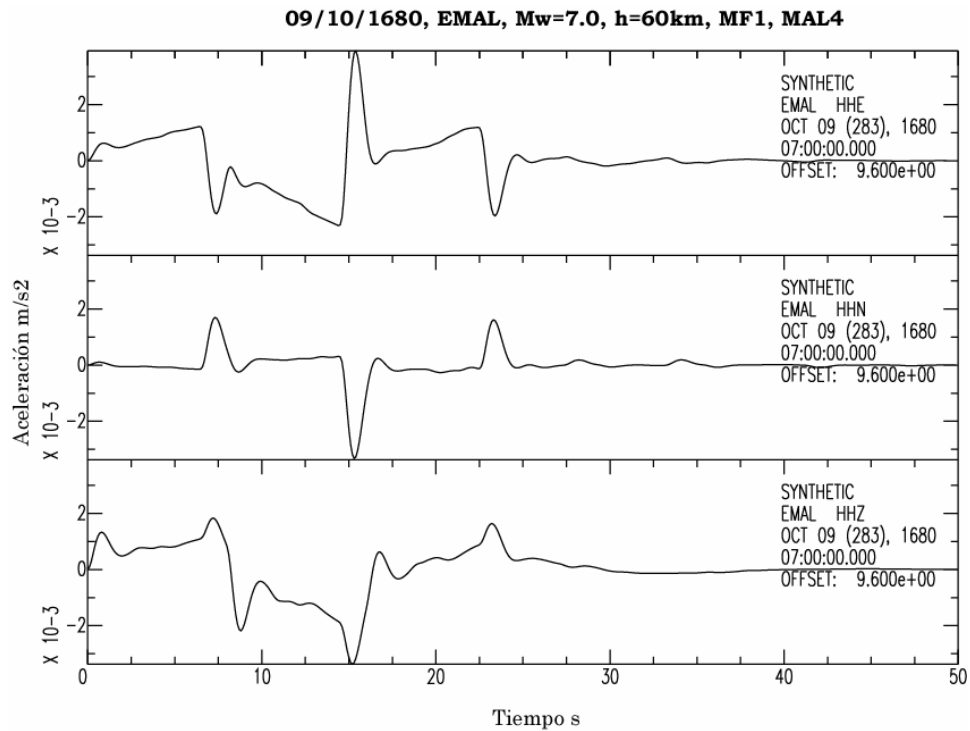


Figura 4.32. Acelerogramas teóricos para el terremoto de Málaga de 1680 a partir del escenario sísmico del sismo de 24/08/02 ( $h=60\text{km}$ ) y con una magnitud  $M_w=7.0$  (modelo MAL4)

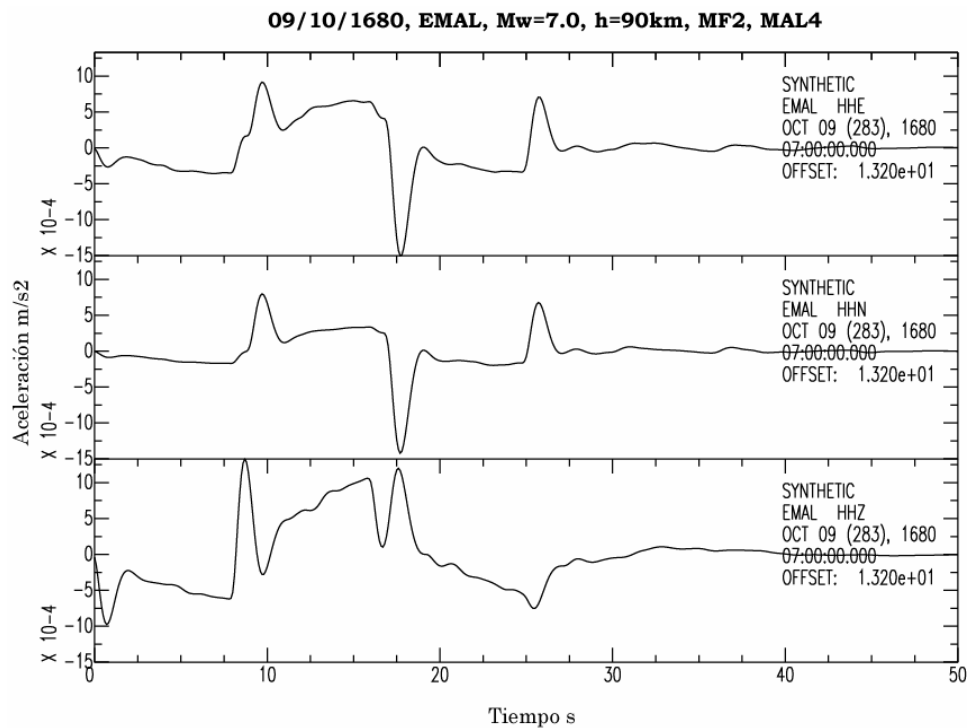


Figura 4.33. Acelerogramas teóricos para el terremoto de Málaga de 1680 a partir del escenario sísmico del sismo de 21/11/02 ( $h=90\text{km}$ ) y con una magnitud  $M_w=7.0$  (modelo MAL4)

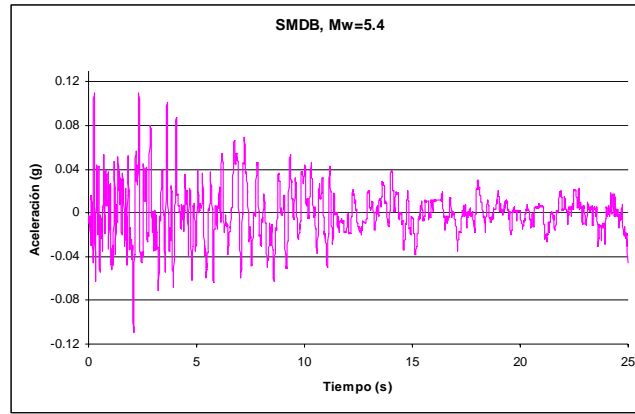


Figura 4.34a. Acelerograma tomado de la base de datos europea de movimientos fuertes ( $M_w=5.4$ , componente vertical)

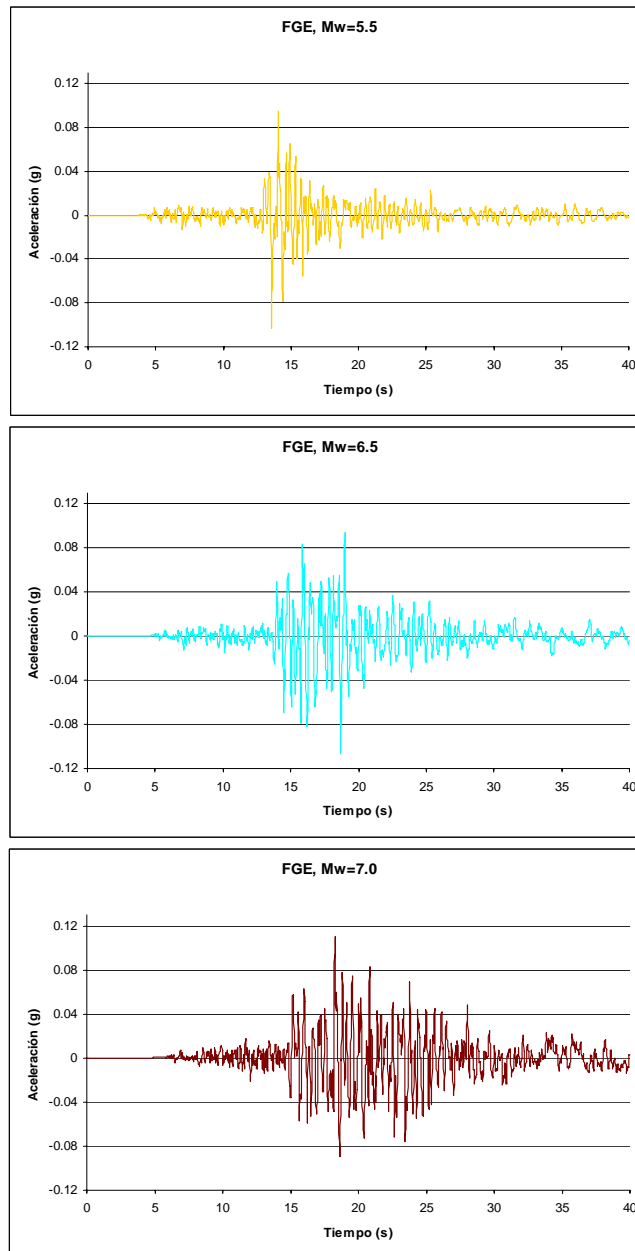


Figura 4.34b. Acelerogramas teóricos a partir del método EGF, para las magnitudes  $M_w$  5.5, 6.5 y 7.0 (componentes este-oeste)



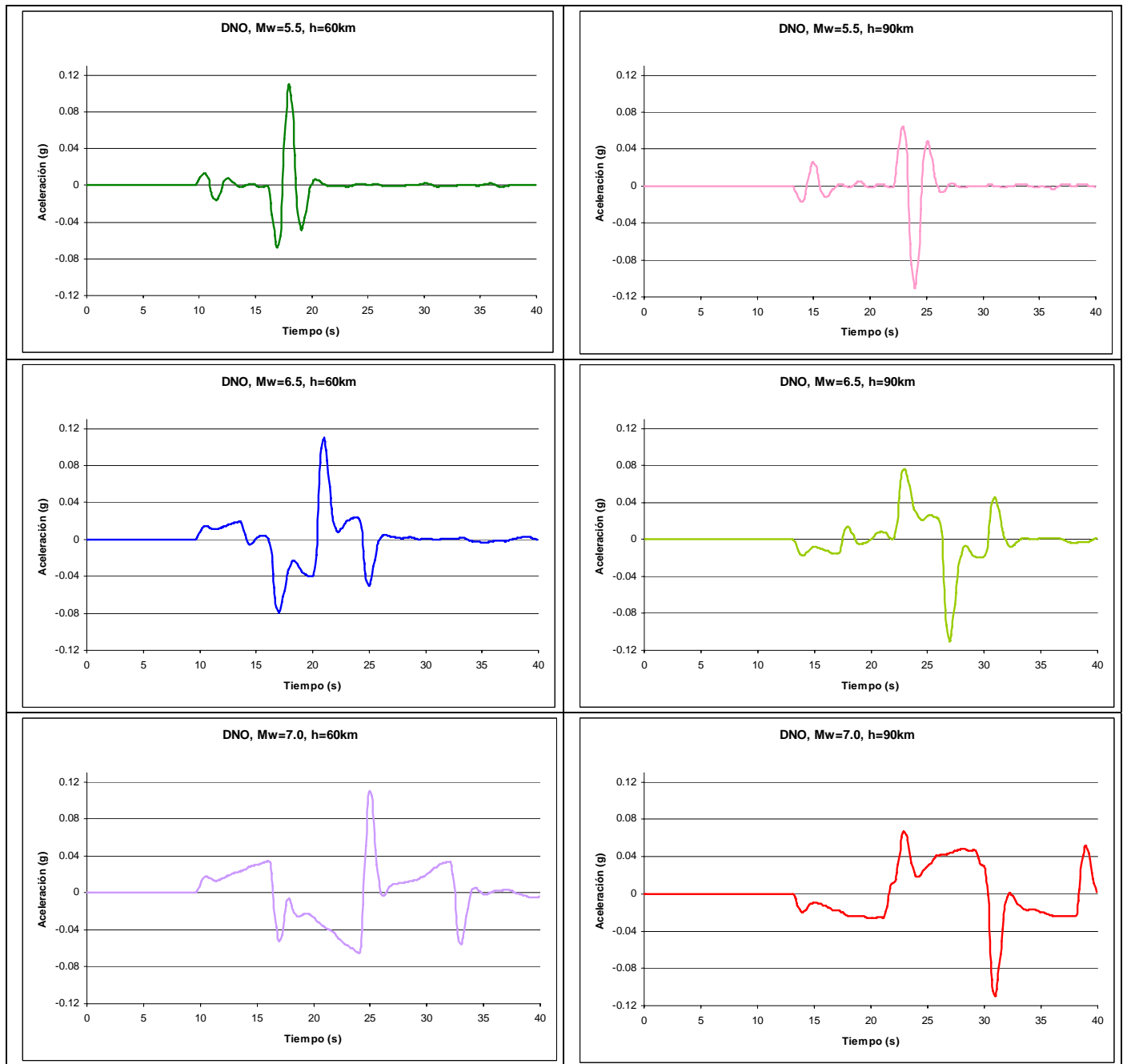


Figura 4.34c. Acelerogramas teóricos a partir del método de la discretización del número de onda, para las magnitudes  $M_w$  5.5, 6.5 y 7.0 y profundidades de 60km y 90km (componentes este-oeste)

En la tabla 4.18 se muestran los parámetros de los acelerogramas de entrada en roca utilizados en *ProShake*, y en la figura 4.35 se muestra la comparación entre los espectros de respuesta de todos ellos con las normas NCSE-02 y Eurocode 8.

En la figura 4.35 puede observarse cómo los espectros correspondientes a los resultados obtenidos a partir de la discretización del número de onda (IM5 a IM10), no

son válidos para realizar un estudio de los efectos locales del suelo, pues la amplitud de los mismos es mucho menor que la de la norma NCSE-02. Además, pueden observarse unos máximos a altos periodos, franja en la que estos registros presentan la mayor parte de la información sísmica (recuérdese que estos registros se filtraron con un pasa-bajas de 0.5Hz). Como era de esperar, la pérdida de altas frecuencias por encima de 0.5Hz hace imposible la aplicación de estos acelerogramas a estudios de efecto de sitio, por lo que los registros obtenidos con el método de la discretización del número de onda quedan descartados en dicho estudio.

Los acelerogramas obtenidos mediante el método de las funciones de Green empíricas parecen dar mejores resultados que los anteriores, lo cual se puede explicar por el hecho de que han perdido menos contenido frecuencial, al haber sido filtrados a 3.0Hz. Sin embargo, los máximos en los espectros IM3 e IM4 no coinciden con los de ambas normas, situándose a mayores periodos, en torno a los 0.5s. Esto indica que ambos registros (los de mayores magnitudes,  $M_w$  6.5 y 7.0, respectivamente), han perdido más altas frecuencias que el registro IM2 ( $M_w=5.5$ ), a pesar de haberse utilizado una fuente trapezoidal para los mismos. Este resultado viene a confirmar el hecho de que con el método de las funciones de Green empíricas no pueden generarse registros con mucha diferencia de magnitud con la función de Green, en todo caso menor de 2.5, valor al que se acercan IM3 e IM4 ( $EGF$  de  $M_w=4.3$ ). El registro IM2 es, por tanto, el único que presenta un espectro de respuesta similar al de la norma NCSE-02. Por ello, se han obtenido las funciones de transferencia y las amplificaciones del suelo utilizando el registro IM2 (figura 4.36), como registro de aceleración de entrada en *ProShake*, y se ha realizado una comparación con IM1, el registro procedente de la base de datos europea con el que se ha realizado el estudio completo.

Esta comparación servirá de prueba para ver si IM2 podría utilizarse en el estudio del efecto de sitio en Málaga. Debe hacerse notar que los resultados deberán tomarse con cautela, pues, si bien se trata de un registro obtenido a partir de un sismograma observado en Málaga, el resultado es un acelerograma que ha perdido las frecuencias por encima de 3.0Hz, es decir, la parte más importante de su contenido frecuencial en estudios de peligrosidad. A falta de un acelerograma registrado en la propia ciudad de Málaga, el registro IM1, cuyo espectro de respuesta es similar al propuesto por las normas NCSE-02 y Eurocode 8, y que no ha perdido las altas

frecuencias, se considera la mejor opción para obtener las amplificaciones del suelo en la ciudad, a pesar de pertenecer a un terremoto ocurrido en Italia.

Tabla 4.18. Características de los diferentes acelerogramas de entrada en roca utilizados en *ProShake*

Acelerograma	Metodología	$M_w$	Sismo original	Componente	Muestreo	$a_{max}$ (g)
IM1	SMDB	5.4 (mb)	05/07/84 (Italia)	Z	0.01	0.11
IM2	FGE	5.5	21/11/02 (Málaga)	E	0.02	0.11
IM3	FGE	6.5	21/11/02 (Málaga)	E	0.02	0.11
IM4	FGE	7.0	21/11/02 (Málaga)	E	0.02	0.11
IM5	DNO	5.5	24/08/02 (Málaga)	E	0.1	0.11
IM6	DNO	6.5	24/08/02 (Málaga)	E	0.1	0.11
IM7	DNO	7.0	24/08/02 (Málaga)	E	0.1	0.11
IM8	DNO	5.5	21/11/02 (Málaga)	E	0.1	0.11
IM9	DNO	6.5	21/11/02 (Málaga)	E	0.1	0.11
IM10	DNO	7.0	21/11/02 (Málaga)	E	0.1	0.11

SMDB: European Strong Motion Database; FGE: Funciones de Green  
Empíricas; DNO: Discretización del Número de Onda

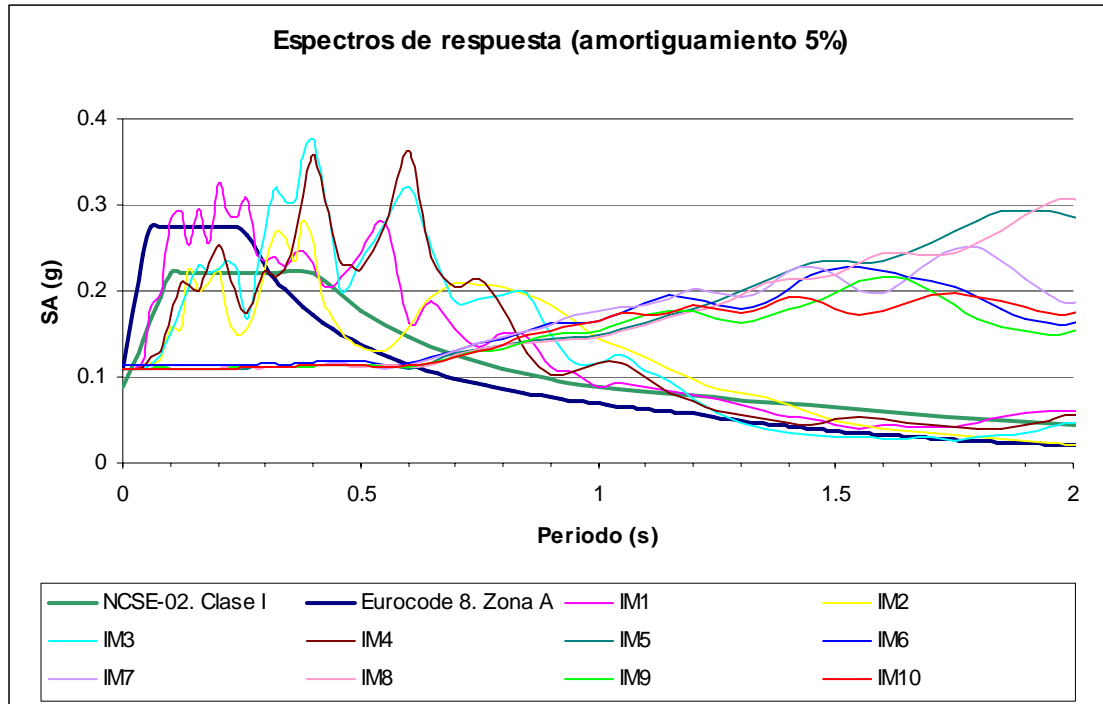


Figura 4.35. Espectros de respuesta para distintos registros de aceleración obtenidos con diferentes metodologías, y espectros de respuesta de la norma NCSE-02 y el Eurocode 8. Los registros se numeran de acuerdo a la tabla 4.18

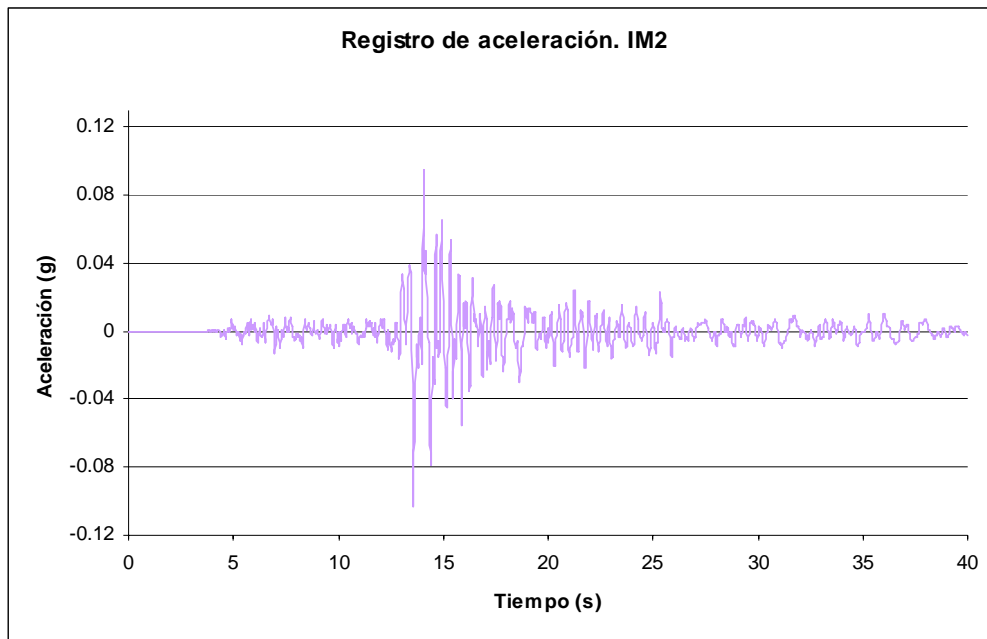


Figura 4.36. Registro IM2 de aceleración en roca (método *EGF*,  $M_w=5.5$ )

En la tabla 4.19 se muestran las frecuencias fundamentales, amplificaciones del suelo y amplificaciones en términos de intensidad obtenidas con IM2 para los sondeos modelo de cada una de las subzonas de la nueva microzonación de Málaga, y su comparación con los resultados de IM1. En las figuras 4.37a y 4.37b se comparan las funciones de transferencia con ambos acelerogramas de entrada en roca.

Tabla 4.19. Frecuencias fundamentales, amplificaciones del suelo y amplificaciones en intensidad para los registros IM1 e IM2 y las columnas modelo de cada subzona

Subzona	Ref.	IM	$v_{fund}$ (Hz)	Amplificación	$\Delta I$
A	0a	IM1	18.86	5.90	0.24
		IM2	19.14	6.69	0.06
B1	2b	IM1	4.11	6.57	1.30
		IM2	4.21	6.68	0.94
B2	8b	IM1	2.04	6.24	1.60
		IM2	2.10	6.27	1.03
B3	13b	IM1	1.15	5.37	1.02
		IM2	1.10	5.37	1.64
B4	25b	IM1	0.79	3.81	0.35
		IM2	0.74	3.60	0.34
C	1c	IM1	0.85	3.80	0.37
		IM2	0.80	3.61	0.52

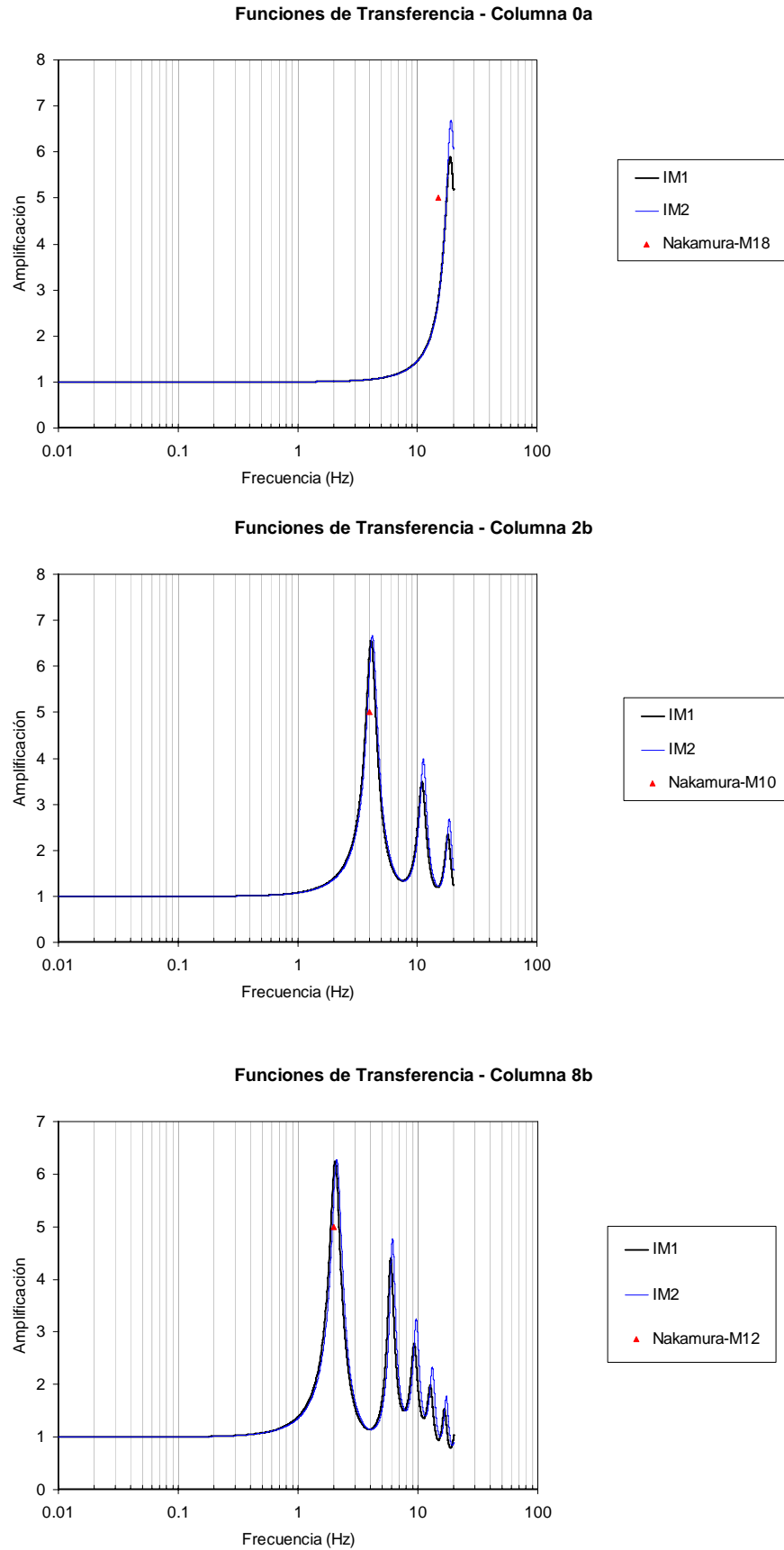


Figura 4.37a. Funciones de transferencia para los registros IM1 e IM2 de aceleración en roca, para cada una de las columnas modelo de cada zona. Zonas A, B1 y B2

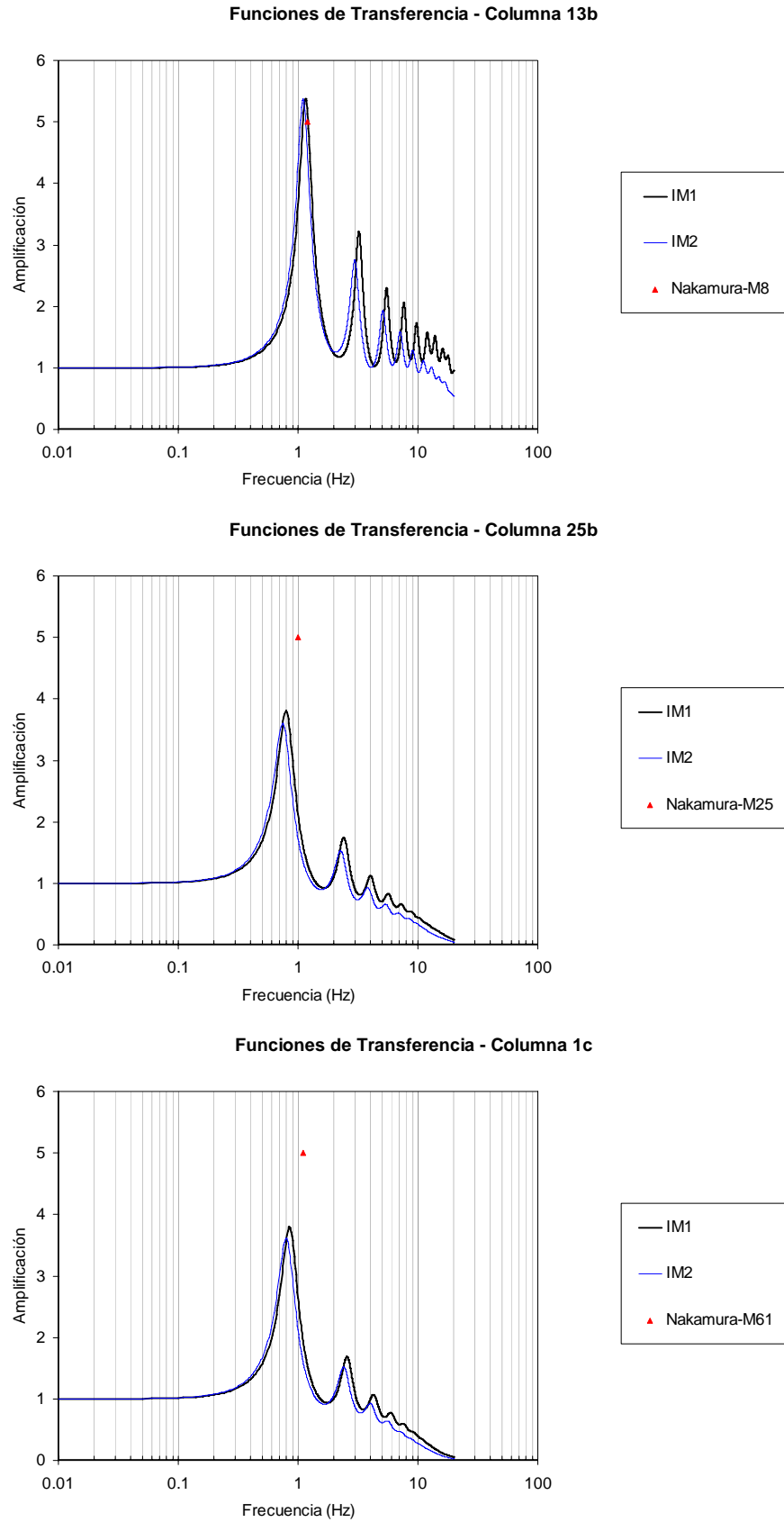


Figura 4.37b. Funciones de transferencia para los registros IM1 e IM2 de aceleración en roca, para cada una de las columnas modelo de cada zona. Zonas B3, B4 y C

Como puede observarse (figuras 4.37a y 4.37b), las funciones de transferencia de las columnas modelo con los registros IM1 e IM2 presentan grandes similitudes en todas las zonas excepto en la zona A, en roca, donde con IM2 se obtienen amplificaciones del suelo un grado mayor que con IM1. Por tanto, a partir del análisis de las funciones de transferencia se podría pensar que el registro IM2 es tan válido como IM1 para realizar el estudio de los efectos locales del suelo. Sin embargo, a efectos de aplicarlo a los estudios de vulnerabilidad, los resultados más relevantes son las amplificaciones del suelo en términos de intensidad, y ahí sí aparecen grandes diferencias entre los dos acelerogramas de entrada. Especialmente significativas son las diferencias en las zonas B2 y B3, donde  $\Delta I$  es medio grado menor con IM2 que con IM1 en la zona B2, y medio grado mayor en la zona B3. Estas variaciones son las que hacen que la microzonación de Málaga sea completamente distinta según si se utiliza IM1 o IM2. La pérdida de altas frecuencias (y con ello de las mayores amplitudes), en IM2 hace que se tomen sus resultados con cautela. Pero además existe otro motivo de peso por el que se tomarán los resultados de IM1 como los más válidos en el estudio de efecto de sitio en el centro de Málaga, que se aplicarán en los estudios de vulnerabilidad y escenarios de daño. Se trata de la comparación que puede realizarse entre los valores de  $\Delta I$  obtenidos con *ProShake* y los grados de daño sufridos por los monumentos de Málaga en el terremoto de 1680. Es especialmente significativo el hecho de que la zona B2, la de mayor valor de  $\Delta I$  obtenida con IM1, no sólo es la zona con mayor cantidad de monumentos en 1680, sino la zona con un mayor porcentaje de edificios con daños 4 y 5, que corresponden a edificios totalmente destruidos o con daños muy severos. Esta correlación de los resultados de IM1 con los daños observados en 1680, junto con el escepticismo con que deben tomarse los resultados de IM2 hacen que se tome la decisión de considerar los resultados de efectos locales del suelo para el centro de Málaga obtenidos mediante el registro de aceleración en roca IM1, tomado de la base de datos europea de movimientos fuertes del suelo. Se hablará en detalle en el capítulo 5 de esta correlación entre las amplificaciones en términos de intensidad y los grados de daño en 1680, utilizando los registros de aceleración en roca IM1 e IM2.

#### 4.4. Comparación de los resultados obtenidos con la técnica de Nakamura y el método 1D lineal equivalente

Una vez analizados los resultados de los efectos locales del suelo mediante la técnica de Nakamura y el método 1D lineal-equivalente, se ha realizado una comparación de las frecuencias fundamentales obtenidas en las columnas de suelo analizadas con *ProShake*, y las medidas de ruido sísmico más cercanas a dichas columnas (tabla 4.20). Para ello, se han utilizado los resultados de *ProShake* con el acelerograma de entrada en roca proveniente de la base de datos europea de movimientos fuertes del suelo, con el que se ha realizado el estudio completo de efecto de sitio y que, según se ha descrito en el apartado anterior, presenta los resultados más fiables que se aplicarán en el estudio de vulnerabilidad.

En la figura 4.38 se muestra la correlación entre las frecuencias fundamentales obtenidas mediante las dos metodologías, para todas las columnas de suelo y las columnas modelo de cada zona, respectivamente. En las tablas 4.20 y 4.21 se muestran estos resultados en forma de tabla, donde aparecen las medidas de ruido elegidas como los emplazamientos más cercanos a las columnas de suelo. Puede observarse el buen ajuste de los resultados. La única excepción procede de la columna de roca, pues, como ya se ha comentado anteriormente, con *ProShake* se ha tomado una columna de referencia característica de la zona rocosa de Málaga. El buen ajuste en las frecuencias puede indicar, en primer lugar, que las medidas de ruido más cercanas a las columnas de suelo se han elegido adecuadamente (para ello se tuvo en cuenta que formaran parte de la misma subzona), y en segundo lugar, es indicativo de que la información contenida en los sondeos geotécnicos es suficientemente detallada como para proporcionar resultados fiables.



Tabla 4.20. Frecuencias fundamentales del método del cociente espectral H/V y el método 1D lineal equivalente (en negrita se marcan las columnas modelo de cada tipo de suelo)

Ref.	Nº sondeo	Subzona	$v_{fund}$ (Hz) (ProShake)	$v_{fund}$ (Hz) (Nakamura)	Medida de ruido
0a	ROCA	A	18.86	15.0	M18
1a	5140	A	3.41	2.5	M19
2a	6385	A	----	----	----
3a	6843	A	----	----	----
4a	5383	A	----	----	----
1b	7284	B1	4.17	4.0	M10
<b>2b</b>	<b>8372</b>	<b>B1</b>	<b>4.11</b>	<b>4.0</b>	<b>M10</b>
3b	37	B2	1.85	2.0	M12
4b	173	B2	1.86	2.0	M11
5b	276	B2	2.15	2.0	M12
6b	2047	B2	1.97	2.0	M11
7b	7686	B2	1.37	1.7	M16
<b>8b</b>	<b>7740</b>	<b>B2</b>	<b>2.04</b>	<b>2.0</b>	<b>M12</b>
9b	8691	B2	1.19	1.7	M16
10b	221	B3	1.07	1.2	M8
11b	1681	B3	1.11	1.0	M44
12b	3926	B3	1.15	1.2	M8
<b>13b</b>	<b>5335</b>	<b>B3</b>	<b>1.15</b>	<b>1.2</b>	<b>M8</b>
14b	6440	B3	1.15	1.0	M24
15b	6784	B3	0.85	1.2	M8
16b	7617	B3	1.04	1.0	M24
17b	7624	B3	1.26	1.2	M8
18b	4646	B3	1.43	1.1	M15
19b	6405	B3	1.01	1.3	M13
20b	1972	B3	1.07	1.0	M24
21b	6957	B3	1.18	1.1	M61
22b	8725	B3	1.07	1.1	M61
23b	8777	B3	1.22	1.2	M8
24b	2005	B4	0.91	1.1	M23
<b>25b</b>	<b>7036</b>	<b>B4</b>	<b>0.79</b>	<b>1.0</b>	<b>M25</b>
<b>1c</b>	<b>7494</b>	<b>C</b>	<b>0.85</b>	<b>1.0</b>	<b>M59</b>

Tabla 4.21. Frecuencias fundamentales: método del cociente espectral H/V y método 1D lineal equivalente: columnas modelo de cada una de las zonas definidas

Ref.	Nº sondeo	Subzona	$v_{fund}$ (Hz) (ProShake)	$v_{fund}$ (Hz) (Nakamura)	Medida de ruido
0a	ROCA	A	18.86	15.00 ± 0.00	M18
2b	8372	B1	4.11 ± 0.03	4.0 ± 0.7	M10
8b	7740	B2	2.04 ± 0.03	2.0 ± 0.3	M12
13b	5335	B3	1.15 ± 0.02	1.20 ± 0.00	M8
25b	7036	B4	0.84 ± 0.05	1.00 ± 0.02	M25
1c	7494	C	0.85	1.00 ± 0.02	M59

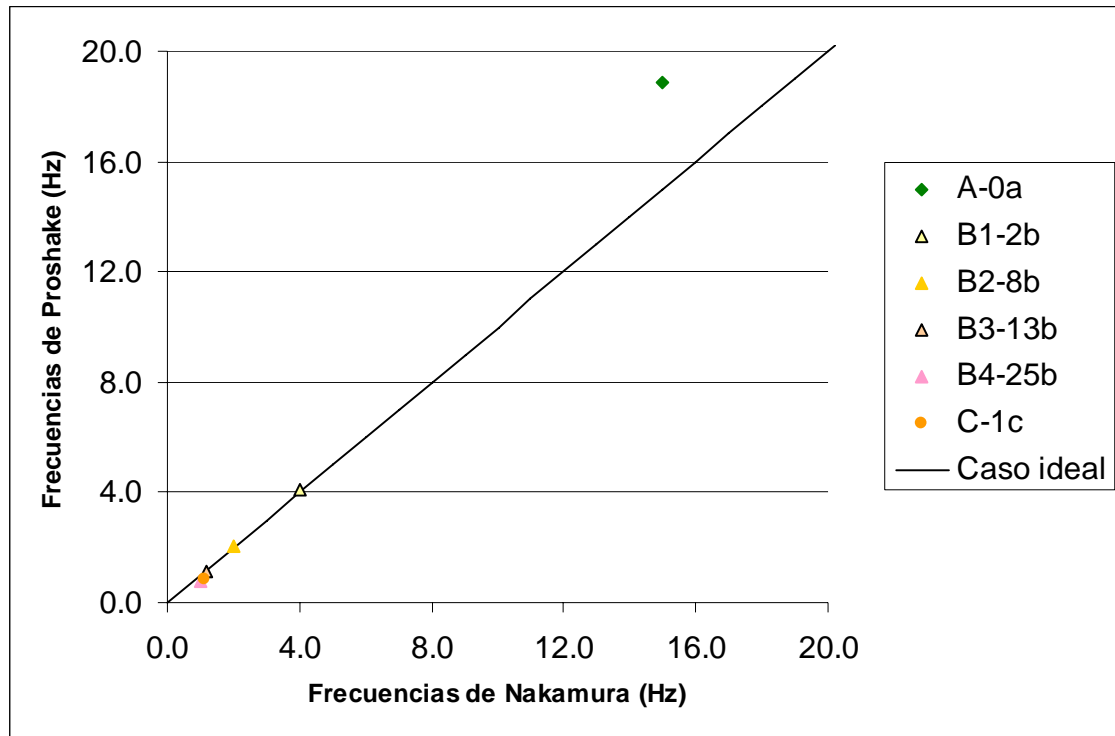


Figura 4.38. Frecuencias fundamentales de las columnas de suelo obtenidas con *ProShake*, frente a las frecuencias de Nakamura de las medidas de ruido más cercanas a éstas. Se muestran sólo las columnas modelo de cada zona



---

## *Capítulo 5*

# *Vulnerabilidad en la ciudad de Málaga*

---



### 5.1. Introducción

En este capítulo se va a aplicar el método de los índices de vulnerabilidad a los monumentos del centro de Málaga que fueron dañados en el terremoto de 1680 y que siguen existiendo en la actualidad. El objetivo es conocer cuán vulnerables son estos edificios y comparar los resultados con los daños observados en 1680 (Goded *et al.*, 2007).

El fuerte terremoto de 1680 causó graves daños en la ciudad de Málaga: hubo un 20% de las casas totalmente destruidas y un 30% de edificios inhabitables. De los cuatro barrios o parroquias en que se encontraba dividida la ciudad (Sagrario, San Juan, Santos Mártires y Santiago), los de San Juan y Santos Mártires fueron los más dañados, con un 25% de casas destruidas. La parroquia menos dañada “tan sólo” tuvo un 10% de edificios destruidos (Muñoz y Udías, 1988; Goded, 2006). Se trató, sin duda, de uno de los sismos más destructivos de la ciudad.

Asimismo, los monumentos de la ciudad sufrieron daños considerables: de los 31 monumentos de los que se tiene información de daños tras el sismo, cuatro sufrieron daños de grado 5 (escala EMS-98), y dieciséis grado 4 (Goded, 2006; Goded *et al.*, 2008a). La gran mayoría de estos edificios tuvieron que ser intervenidos de uno u otro modo: se realizaron desde “algunos reparos” en la Catedral (grado de daño 2), hasta la completa reconstrucción de los que sufrieron mayores daños. Fue tal la envergadura del desastre que basta leer detenidamente una guía de arte, de arquitectura o incluso una guía turística de Málaga para observar cómo, en una cantidad considerable de edificios, se habla de que todo o una parte de los mismos se reconstruyeron “a finales del siglo XVII o principios del XVIII”.

Una primera comparación entre los resultados de efecto de sitio de este estudio y los daños sufridos en 1680 puede hacerse a partir de la distribución de daños en las cuatro parroquias de Málaga, y su comparación con la microzonación de Málaga en términos de intensidad de este estudio (figura 5.1). Se observa cómo los dos barrios más dañados (San Juan y Santos Mártires), con un 25% de casas destruidas, son aquéllos que incluyen las zonas de mayores amplificaciones (+1.0 y +1.5) y que no presentan zona de

roca. En la parroquia de Santiago hay una mayor proporción de zona de amplificación  $+1.5$ , y, sin embargo, tuvo menos daños que el barrio de Santos Mártires, por ejemplo. No obstante, se sabe que la edificación del barrio de Santiago en 1680 comprendía una pequeña fracción de dicha zona, como se desprende en los mapas de la época (Muñoz y Udías, 1988).

Por otro lado, la parroquia de Sagrario, con menor proporción de zona con  $\Delta I = +1.5$  que Santiago, tuvo asimismo un menor porcentaje de edificios “destruidos” e “inhabitables” (15% en Sagrario frente al 27% en Santiago). Por tanto, las mayores amplificaciones en términos de intensidad del centro de Málaga obtenidas en esta tesis, se corresponden aproximadamente con las parroquias más dañadas en el terremoto de 1680, y los barrios menos dañados son los que presentan una zona sin amplificaciones debido a la presencia de roca aflorante. Esto indica que existe una coherencia entre la microzonación del centro de Málaga y la distribución de daños por parroquias en el sismo del siglo XVII.

Es importante hacer constar que el arrabal del Perchel, perteneciente al barrio de San Juan y construido en el margen derecho del río Guadalmedina (figura 5.1), fue quizá la zona más dañada de la ciudad, con al menos 60 víctimas mortales y 225 casas desplomadas. Este barrio forma parte de una zona con altas amplificaciones ( $\Delta I = +1.0$ ), pero no se encuentra en la región de mayores amplificaciones. Sin embargo, se trataba de un barrio pobre y por tanto de peor construcción, pues seguramente las casas estaban construidas con materiales más pobres que las del resto de parroquias. Por tanto, la combinación entre el efecto de sitio y la pobreza del arrabal explicaría por qué sus daños fueron tan cuantiosos. Parece, pues, que a partir de los resultados del estudio del efecto de sitio en Málaga se puede comprender por qué unas zonas fueron más dañadas que otras durante el terremoto de octubre de 1680.

## **5.2. Monumentos estudiados**

En las tablas 5.1a y 5.1b se muestra el grado de daño sufrido por los monumentos en el sismo de 1680. También se indica la calidad en la asignación del grado de daño, en función de la información recopilada ( $\alpha$ , con información abundante

y detallada;  $\beta$ , caso intermedio; y  $\gamma$ , con pobre información de los daños). En la figura 5.2 se muestra la localización de estos monumentos.

Partiendo de esta información, se ha analizado el estado actual de estos edificios, que incluyen cinco casas particulares de personas influyentes de la ciudad. Los resultados se muestran en la tabla 5.2, donde se indica la clasificación de los mismos en función de la relación del monumento actual con el de 1680, pues en algunos casos el edificio existe pero se ha reconstruido totalmente, y en otros el edificio ha cambiado de tipología, por ejemplo en el caso de antiguos conventos de los que sólo queda la iglesia. Esta clasificación se tendrá en cuenta a la hora de hallar los índices de vulnerabilidad de los mismos.

En la tabla 5.2 puede observarse que, de los 36 edificios con información de daños en 1680, 11 siguen existiendo y mantienen la misma tipología que en 1680 (clase A), 4 de ellos han cambiado de tipología (clase B), 4 se han reconstruido sobre los anteriores (clase C), 11 monumentos han desaparecido (clase D), y en 6 de ellos no se ha encontrado información de su estado actual (entre ellos las 5 casas particulares). Por tanto, se realizará el estudio de vulnerabilidad en un total de 19 monumentos, para los edificios de clases A, B y C. La gran cantidad de monumentos desaparecidos en la zona centro son, en su mayor parte, debidos a la gran cantidad de derribos y reconstrucciones realizados en la ciudad en el siglo XIX, durante la desamortización (Ayala, 1999).

En la tabla 5.3 se muestra la referencia asignada a cada una de las tipologías de los monumentos con los que se va a tratar (tanto en este capítulo como en el capítulo 6 de los escenarios sísmicos).

En la tabla 5.4 se resumen las características de los 19 monumentos cuyo estudio de vulnerabilidad se va a realizar. Se incluye la época de construcción y la tipología de los mismos tanto en 1680 como en la actualidad. Asimismo, se indican los cambios en los nombres de algunos de ellos. Durante este estudio de vulnerabilidad se mantendrán los nombres de 1680, ya que se trata, al fin y al cabo, de saber qué pasaría con estos edificios dañados en el pasado. En el capítulo de los escenarios sísmicos de estos monumentos se utilizarán los nombres modernos de los edificios dañados en 1680.



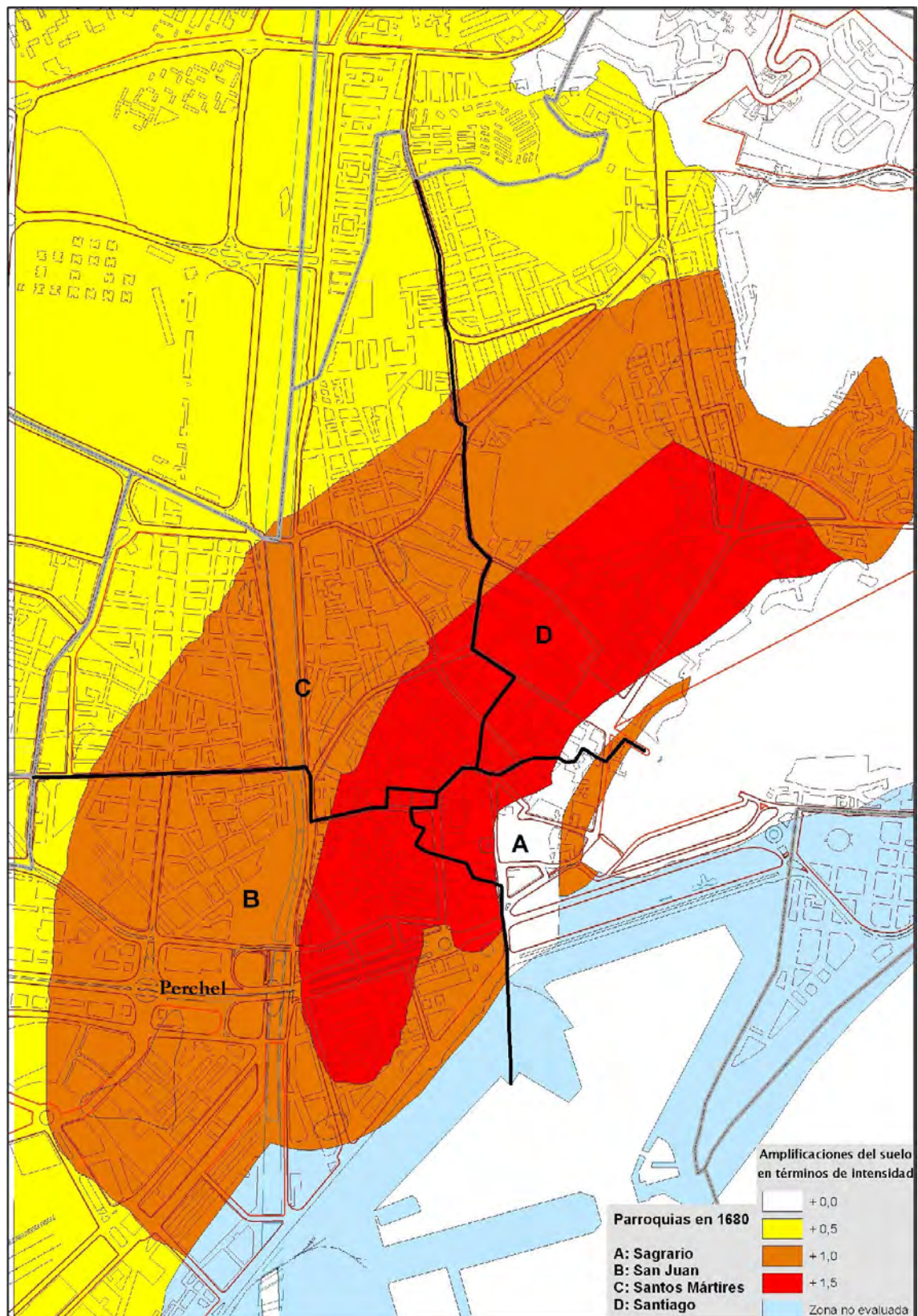


Figura 5.1. Microzonación del centro de Málaga en función de las amplificaciones del suelo en términos de intensidad. Se señalan las cuatro parroquias de Málaga en 1680

Tabla 5.1a. Edificios dañados en 1680. Grados de daño 4 y 5 (Goded, 2006)

Ref.	Monumento	Grado de daño	Calidad	Descripción de los daños
1	Convento de religiosos de San Francisco de Paula	5	$\gamma$	Totalmente arruinado
2	Convento de religiosas de Nuestra Señora de la Paz	5	$\gamma$	Totalmente arruinado
3	Convento de religiosas de San Bernardo	5	$\gamma$	Totalmente arruinado
4	Convento de religiosas de Santa Clara	5	$\gamma$	Totalmente arruinado
5	Casa de don Diego Argote	5	$\beta$	La casa y la torre cayeron al suelo
6	Casa de don Juan de Torres	5	$\beta$	<i>"No quedó ladrillo en pie"</i>
7	Convento de religiosos de los Carmelitas Descalzos	4	$\gamma$	Casi arruinado
8	Convento de religiosos de los Trinitarios Descalzos	4	$\beta$	Amenaza ruina
9	Convento de religiosos de Santo Domingo	4	$\alpha$	Casi arruinado. Parte se hundió. Se cayeron al suelo el capitel y el campanario. Los religiosos salieron del convento
10	Parroquia de San Juan	4	$\alpha$	Amenazaba ruina. Se hundió la torre.
11	Iglesia de San Pedro en los Percheles	4	$\gamma$	Casi arruinada
12	Colegio de los Clérigos Menores	4	$\gamma$	Amenaza ruina
13	Convento de religiosos de San Francisco	4	$\alpha$	Se cayeron una torre, la escalera principal, un dormitorio y parte de un claustro. Se necesitaba levantar de nuevo desde sus cimientos. Hubo 4 religiosos muertos y 6 heridos en este convento
14	Convento de religiosos de los Capuchinos	4	$\beta$	Casi totalmente arruinado. Los religiosos tuvieron que salir del convento.
15	Convento de religiosas de la Encarnación	4	$\beta$	Medio destruido. Las religiosas se trasladaron al Císter hasta que lo reconstruyeron. El Ayuntamiento empleó 2000 reales en su reconstrucción.
16	Convento de religiosas de las Dominicas	4	$\gamma$	Casi totalmente arruinado. Las religiosas tuvieron que salir del convento.
17	Parroquia de los Santos Mártires	4	$\alpha$	Casi totalmente arruinada. Se hundieron la Sacristía y una capilla colateral. El resto de la iglesia quedó en tan mal estado que hubo que apuntalarla, para ir demoliendo gran parte de los arcos y pilares. Se cayó un trozo de la torre.
18	Iglesia de San Pablo	4	$\gamma$	Casi arruinada
19	Convento de religiosos de Nuestra Señora de la Merced	4	$\beta$	Casi inhabitable. Se le cayó una torre.
20	Convento de religiosas de las Agustinas Descalzas	4	$\beta$	Medio destruido. Las religiosas se trasladaron al Císter hasta que lo reconstruyeron.
21	Castillo de Gibralfaro	4	$\beta$	Murallas dañadas, se cayeron algunos tramos. La parte más dañada fue la de la Puerta de Espartería a la Puerta del Mar. Las viviendas de su interior quedaron muy dañadas.
22	La Alcazaba	4	$\beta$	Murallas dañadas, se cayeron algunos tramos. La parte más dañada fue la de la Puerta de Espartería a la Puerta del Mar. Las viviendas de su interior quedaron muy dañadas. La Alcazaba fue reparada en 1681, y también la Torre de la Pólvara.
23	Casa de don Diego de Córdoba	4	$\gamma$	<i>"Se abrió su casa con gran daño"</i>

En la figura 5.3 se muestra la distribución de los 19 monumentos según la fecha de construcción. Se puede observar cómo la gran mayoría son construcciones de los siglos XVI y XVII, que, junto con los dos monumentos del siglo XV, forman parte de

las primeras construcciones cristianas tras la conquista de Málaga por los Reyes Católicos en 1487. Las tres edificaciones de los siglos XVIII y XIX corresponden a reconstrucciones de antiguos monumentos, como ya se ha comentado. Por otro lado, los dos monumentos del siglo XI corresponden a la Alcazaba y el castillo de Gibralfaro, construcciones musulmanas muy anteriores a las edificaciones cristianas. Conviene destacar la ausencia de monumentos de los siglos XII-XIV que, de existir, corresponderían también a construcciones de época musulmana. Es posible que todas las que pudiera haber en la ciudad en la época de la conquista fueran demolidas por los reyes cristianos, tales como la Alcaicería (Candau *et al.*, 2005). Solamente se conservaron los dos castillos medievales debido a su gran valor estratégico e interés militar, pues se encuentran en una de las colinas de la ciudad, y fueron utilizados posteriormente como fortalezas defensivas.

Tabla 5.1b. Edificios dañados en 1680. Grados de daño 2 y 3 (Goded, 2006)

Ref.	Monumento	Grado de daño	Calidad	Descripción de los daños
24	Convento de religiosos de los Ángeles Trinitarios Calzados	3	$\alpha$	La torre del campanario se abrió y cayó. Al caer derribó el claustro. La campana pequeña se cayó y la grande quedó pendiente de la soga. Se abrió una pared de la celda ministerial. Cayó una imagen de su nicho. Tejas caídas, paredes desconchadas. A pesar de ello se indica que los daños no fueron tan notables como en otros edificios.
25	Convento de religiosos de la Compañía de Jesús	3	$\gamma$	Iglesia y convento con considerable daño
26	Convento de religiosos de Nuestra Señora de la Victoria	3	$\beta$	Sin grandes daños. Se hundieron un dormitorio de los coristas y la mitad de las bóvedas.
27	Convento de religiosas de las Recoletas Bernardas (del Císter)	3	$\gamma$	Muy dañado. Sin embargo las religiosas de los conventos de la Encarnación y las Agustinas Descalzas se alojaron en este convento hasta que repararon los suyos, mucho más dañados.
28	Parroquia de Sagrario	3	$\gamma$	Se torció un arco de la capilla. Otra fuente indica que fue casi destruida.
29	Casa Episcopal	3	$\gamma$	Necesita algunos reparos. Muy dañado.
30	Colegio Seminario	3	$\gamma$	Muy dañado
31	Casa del gobernador	3	$\gamma$	"Muy maltratada"
32	Casa del Cabildo	3	$\gamma$	"Muy maltratada"
33	Convento de religiosos de San Juan de Dios	2	$\gamma$	Sin grandes daños
34	Convento de religiosos de San Agustín	2	$\gamma$	Necesita reparaciones. Sin grandes daños
35	Convento de religiosas de las Carmelitas Descalzas	2	$\alpha$	Se rajó la torre del campanario. Se salieron unos ladrillos de en medio y se volvieron a unir. Se derribaron todas las claves de la galería. Se cayó la imagen de San Andrés.
36	Catedral	2	$\beta$	Hundida en varias zonas, aunque fue la iglesia que menos sufrió. Sólo quedó la campana de la catedral en la ciudad. La iglesia se tambaleó hacia los lados. Necesitaba algunos reparos.



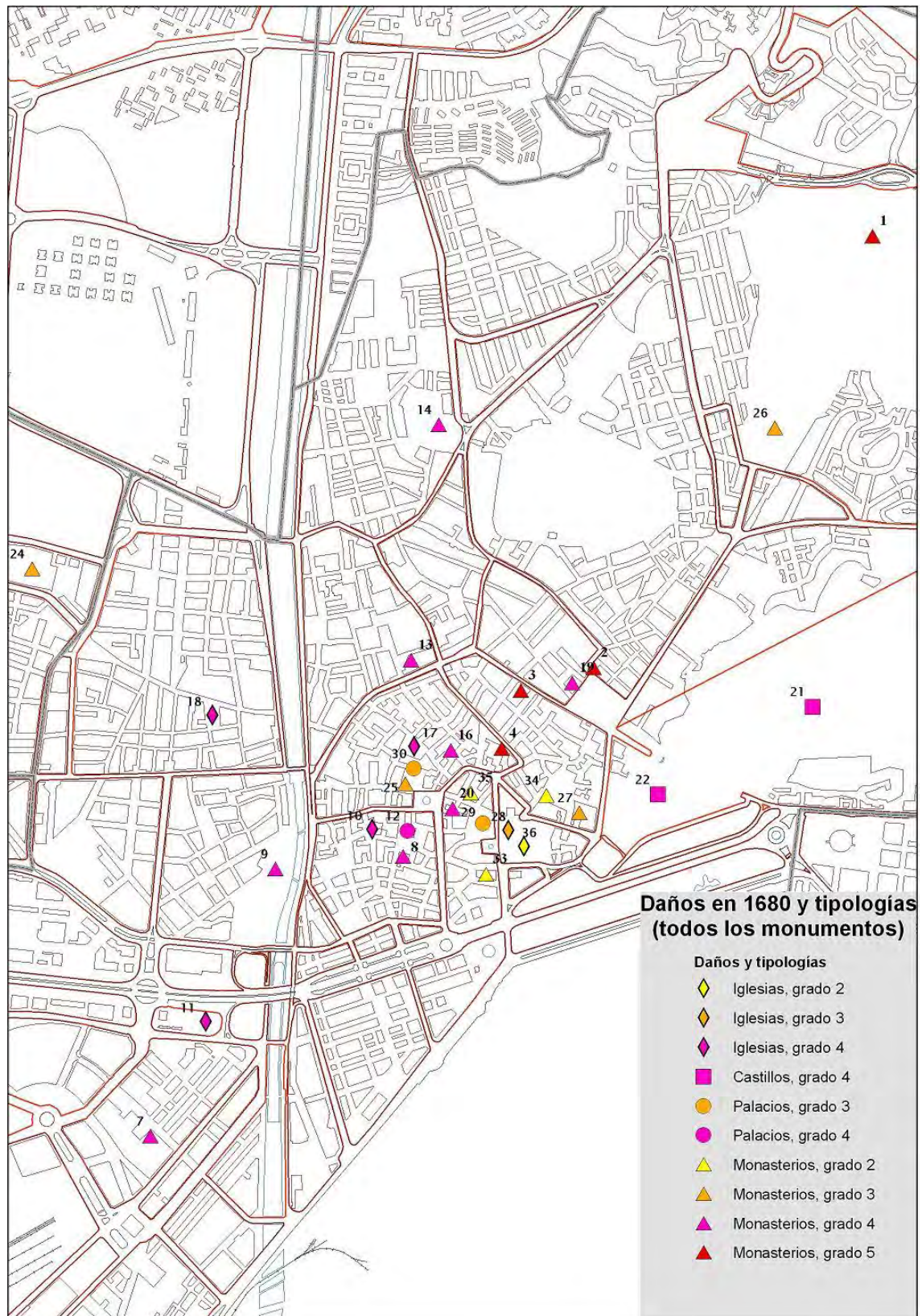


Figura 5.2. Localización de todos los monumentos de Málaga (clasificados según su grado de daño y tipología), dañados en el terremoto de 1680

Tabla 5.2. Estado actual de los edificios dañados en 1680

Ref.	Monumento	Clase	Observaciones
1	Convento de religiosos de San Francisco de Paula	?	Sin información de su existencia actual
2	Convento de religiosas de Nuestra Señora de la Paz	D	Trasladado en el siglo XIX a la Placeta del Compás de la Trinidad
3	Convento de religiosas de San Bernardo	D	Demolido en el siglo XIX, durante la desamortización
4	Convento de religiosas de Santa Clara	D	Demolido (la comunidad vive en un nuevo convento construido sobre parte del solar del convento de los Capuchinos)
5	Casa de don Diego Argote	?	Sin información de su existencia actual
6	Casa de don Juan de Torres	?	Sin información de su existencia actual
7	Convento de religiosos de los Carmelitas Descalzos	B	Ahora iglesia de Nuestra Señora del Carmen. Sólo queda la parroquia, del convento se conservan el claustro y sus dependencias anexas en estado de abandono
8	Convento de religiosos de los Trinitarios Descalzos	D	Demolido en 1901 tras un incendio
9	Convento de religiosos de Santo Domingo	B	También llamado convento de Santo Domingo el Real. Sólo se conserva la iglesia original. El convento fue demolido y reconstruido en el mismo lugar
10	Parroquia de San Juan	A	Ahora llamada iglesia parroquial de San Juan Bautista
11	Iglesia de San Pedro en los Percheles	A	Se conserva en la actualidad
12	Colegio de los Clérigos Menores	C	El colegio fue demolido en 1892, pero mantuvo la iglesia, ahora llamada iglesia de la Concepción
13	Convento de religiosos de San Francisco	D	Desaparecido en el siglo XIX, durante la desamortización
14	Convento de religiosos de los Capuchinos	B	Ahora llamado iglesia parroquial de la Divina Pastora y Santa Teresa de Jesús. Sólo queda la iglesia del antiguo convento
15	Convento de religiosas de la Encarnación	D	El convento cambió su sede varias veces. Actualmente se denomina convento de la Asunción y se encuentra en El Atabal
16	Convento de religiosas de las Dominicas	D	No se ha conservado nada del convento
17	Parroquia de los Santos Mártires	A	Se conserva en la actualidad
18	Iglesia de San Pablo	C	Construida en 1874 en el emplazamiento de la antigua iglesia que existía en 1680
19	Convento de religiosos de Nuestra Señora de la Merced	D	El convento fue demolido en 1873, la iglesia en 1963
20	Convento de religiosas de las Agustinas Descalzas	D	Demolido en el siglo XIX, durante la desamortización
21	Castillo de Gibralfaro	A	Se conserva en la actualidad
22	La Alcazaba	A	Se conserva en la actualidad
23	Casa de don Diego de Córdoba	?	Sin información de su existencia actual
24	Convento de religiosos de los Ángeles Trinitarios Calzados	A	Ahora llamado antiguo convento de San Onofre de Trinitarios Calzados
25	Convento de religiosos de la Compañía de Jesús	B	Ahora iglesia del Santo Cristo de la Salud (San Telmo)
26	Convento de religiosos de Nuestra Señora de la Victoria	C	El convento desapareció en 1836. La antigua iglesia fue demolida y reconstruida en 1693
27	Convento de religiosas de las Recoletas Bernardas (del Císter)	C	Ahora abadía de Santa Ana. Construida en 1873 sobre el antiguo convento
28	Parroquia de Sagrario	A	Se conserva en la actualidad
29	Casa Episcopal	A	Se conserva en la actualidad
30	Colegio Seminario	A	Antiguo colegio jesuita. Ahora colegio de Primaria
31	Casa del gobernador	?	Sin información de su existencia actual
32	Casa del Cabildo	?	Sin información de su existencia actual
33	Convento de religiosos de San Juan de Dios	D	Demolido en 1873
34	Convento de religiosos de San Agustín	A	Se conserva en la actualidad
35	Convento de religiosas de las Carmelitas Descalzas	D	Trasladado a C/Don Rodrigo en 1878 (convento de San José de las Carmelitas Descalzas)
36	Catedral	A	Ahora llamada Santa iglesia de la Catedral / Basílica de la Encarnación

Clases: A: el edificio existe y es del mismo tipo que en 1680; B: el edificio existe, pero ha cambiado su tipología; C: el edificio existe pero es distinto que en 1680, al haberse reconstruido sobre el anterior; D: el edificio ya no existe; ?: información desconocida

Tabla 5.3. Tipologías de monumentos

Referencia	Tipología
I	Iglesia
M	Monasterio/convento
P	Palacio/edificio
C	Castillo
E	Ermita/oratorio/capilla
TE	Teatro
TO	Torre/Campanario

Tabla 5.4. Monumentos de Málaga dañados en 1680  
y que existen en la actualidad

Ref.	Monumento	Época	Tipología en 1680	Tipología actual	Clase	Observaciones
7	Iglesia del convento de los Carmelitas Descalzos	Finales del siglo XVII	M	I	B	Ahora iglesia de Nuestra Señora del Carmen. Sólo queda la parroquia, del convento se conservan el claustro y sus dependencias anexas en estado de abandono.
9	Iglesia del convento de Santo Domingo	1489	M	I	B	También llamado convento de Santo Domingo el Real. Sólo se conserva la iglesia original. El convento fue demolido y reconstruido en el mismo lugar.
10	Parroquia de San Juan	1554	I	I	A	Ahora llamada iglesia parroquial de San Juan Bautista.
11	Iglesia de San Pedro en los Percheles	1629	I	I	A	
12	Iglesia del antiguo Colegio de los Clérigos Menores	1701-1715 (iglesia)	P	I	C	El colegio fue demolido en 1892, pero mantuvo la iglesia, ahora llamada iglesia de la Concepción
14	Iglesia del convento de los Capuchinos	1632	M	I	B	Ahora iglesia parroquial de la Divina Pastora y Santa Teresa de Jesús. Sólo queda la iglesia del antiguo convento.
17	Parroquia de los Santos Mártires	Primera mitad del siglo XVI	I	I	A	
18	Iglesia de San Pablo	1874-1891	I	I	C	Construida en el emplazamiento de la antigua iglesia que existía en 1680
21	Castillo de Gibralfaro	Siglo XI	C	C	A	
22	Alcazaba	Siglos XI-XIV	C	C	A	Monumento Nacional desde 1931
24	Convento de los Ángeles Trinitarios Calzados	Siglo XVI	M	M	A	Ahora llamado antiguo convento de San Onofre de Trinitarios Calzados
25	Iglesia del antiguo convento de la Compañía de Jesús	1590-1630	M	I	B	Ahora iglesia del Santo Cristo de la Salud (San Telmo).
26	Iglesia del convento de Nuestra Señora de la Victoria	1693-1701 (iglesia)	M	I	C	El convento desapareció en 1836. La antigua iglesia fue demolida y reconstruida en 1693
27	Convento de las Recoletas Bernardas del Císter	1873	M	M	C	Ahora abadía de Santa Ana. Construida en 1873 sobre el antiguo convento
28	Parroquia de Sagrario	1488-1710	I	I	A	
29	Casa Episcopal	Siglos XVI-XVIII	P	P	A	
30	Colegio Seminario	1590-1671	P	P	A	Antiguo colegio jesuita. Ahora colegio de Primaria.
34	Convento de San Agustín	Siglo XVII	M	M	A	
36	Catedral	1527-1782	I	I	A	Ahora llamada Santa iglesia de la Catedral / Basílica de la Encarnación

Clases: A: el edificio existe y es del mismo tipo que en 1680; B: el edificio existe, pero ha cambiado su tipología; C: el edificio existe pero es distinto que en 1680, al haberse reconstruido sobre el anterior; D: el edificio ya no existe; ?: información desconocida

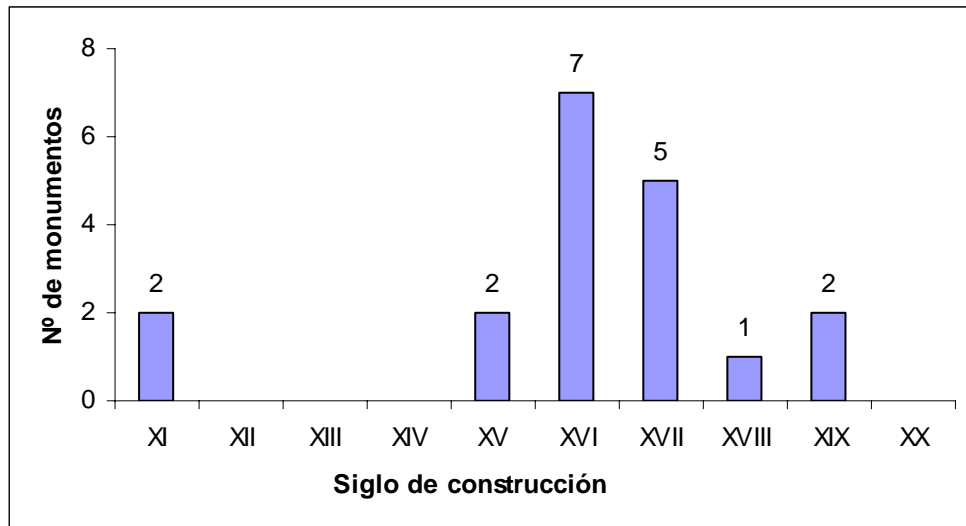


Figura 5.3. Clasificación de los monumentos según su siglo de construcción

En la figura 5.4 se muestra la distribución de los monumentos según su tipología, de acuerdo con la clasificación de Lagomarsino *et al.* (2003). Se observa cómo la gran mayoría de los monumentos corresponden a iglesias (algunas eran iglesias originales y otras lo único que queda de antiguos monasterios), habiendo 12 monumentos con esta tipología, 3 monasterios, 2 castillos y 2 palacios.

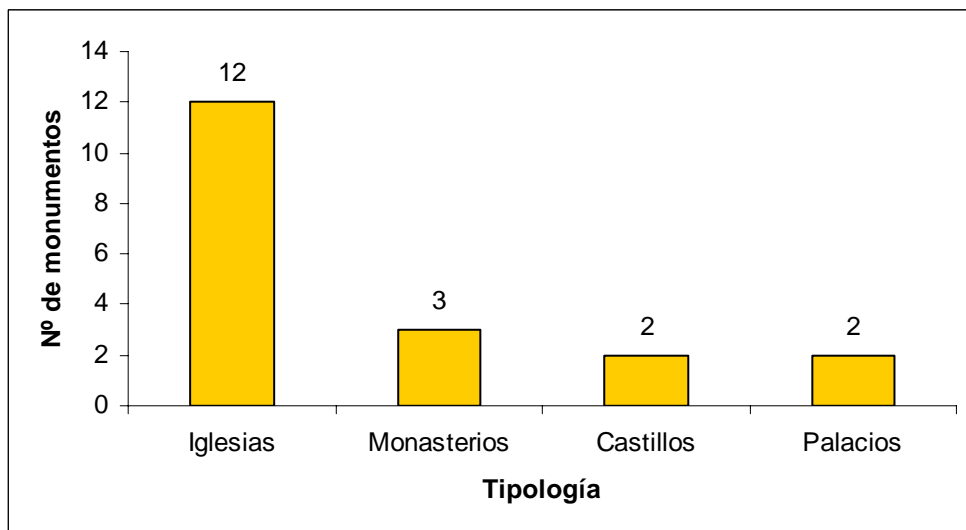


Figura 5.4. Tipologías de los monumentos de Málaga

### 5.3. Resultados

Una vez seleccionados los monumentos de Málaga a estudiar, se procede a aplicar el método de los índices de vulnerabilidad, cuyos resultados se presentan en este apartado.

#### 5.3.1. Aplicación de la microzonación de Málaga

En primer lugar se deben asignar las subzonas de la nueva microzonación de Málaga a los monumentos a estudiar, así como la intensidad que afectaría a cada uno de ellos, lo que implica corregir la intensidad asignada a la ciudad en 1680 por las amplificaciones del suelo de cada zona (tabla 5.5 y figura 5.5). Puede observarse cómo hay una mayoría de monumentos en las zonas B2 y B3, y que por tanto presentan las mayores intensidades, de 8.5 y 9.0.

Tabla 5.5. Monumentos de Málaga dañados en 1680.  
Aplicación de la microzonación de Málaga

Ref.	Monumento	Grado de daño en 1680	Calidad del grado de daño	Subzona	Intensidad
7	Iglesia del convento de los Carmelitas Descalzos	4	$\gamma$	B3	8.5
9	Iglesia del convento de Santo Domingo	4	$\alpha$	B3	8.5
10	Parroquia de San Juan	4	$\alpha$	B2	9.0
11	Iglesia de San Pedro en los Percheles	4	$\gamma$	B3	8.5
12	Iglesia del antiguo Colegio de los Clérigos Menores	4	$\gamma$	B2	9.0
14	Iglesia del convento de los Capuchinos	4	$\beta$	B3	8.5
17	Parroquia de los Santos Mártires	4	$\alpha$	B2	9.0
18	Iglesia de San Pablo	4	$\gamma$	B3	8.5
21	Castillo de Gibralfaro	4	$\beta$	A	7.5
22	Alcazaba	4	$\beta$	A	7.5
24	Convento de los Ángeles Trinitarios Calzados	3	$\alpha$	B4	8.0
25	Iglesia del antiguo convento de la Compañía de Jesús	3	$\gamma$	B2	9.0
26	Iglesia del convento de Nuestra Señora de la Victoria	3	$\beta$	B1	8.5
27	Convento de las Recoletas Bernardas del Císter	3	$\gamma$	B1	8.5
28	Parroquia de Sagrario	3	$\gamma$	A	7.5
29	Casa Episcopal	3	$\gamma$	B2	9.0
30	Colegio Seminario	3	$\gamma$	B2	9.0
34	Convento de San Agustín	2	$\gamma$	A	7.5
36	Catedral	2	$\beta$	A	7.5



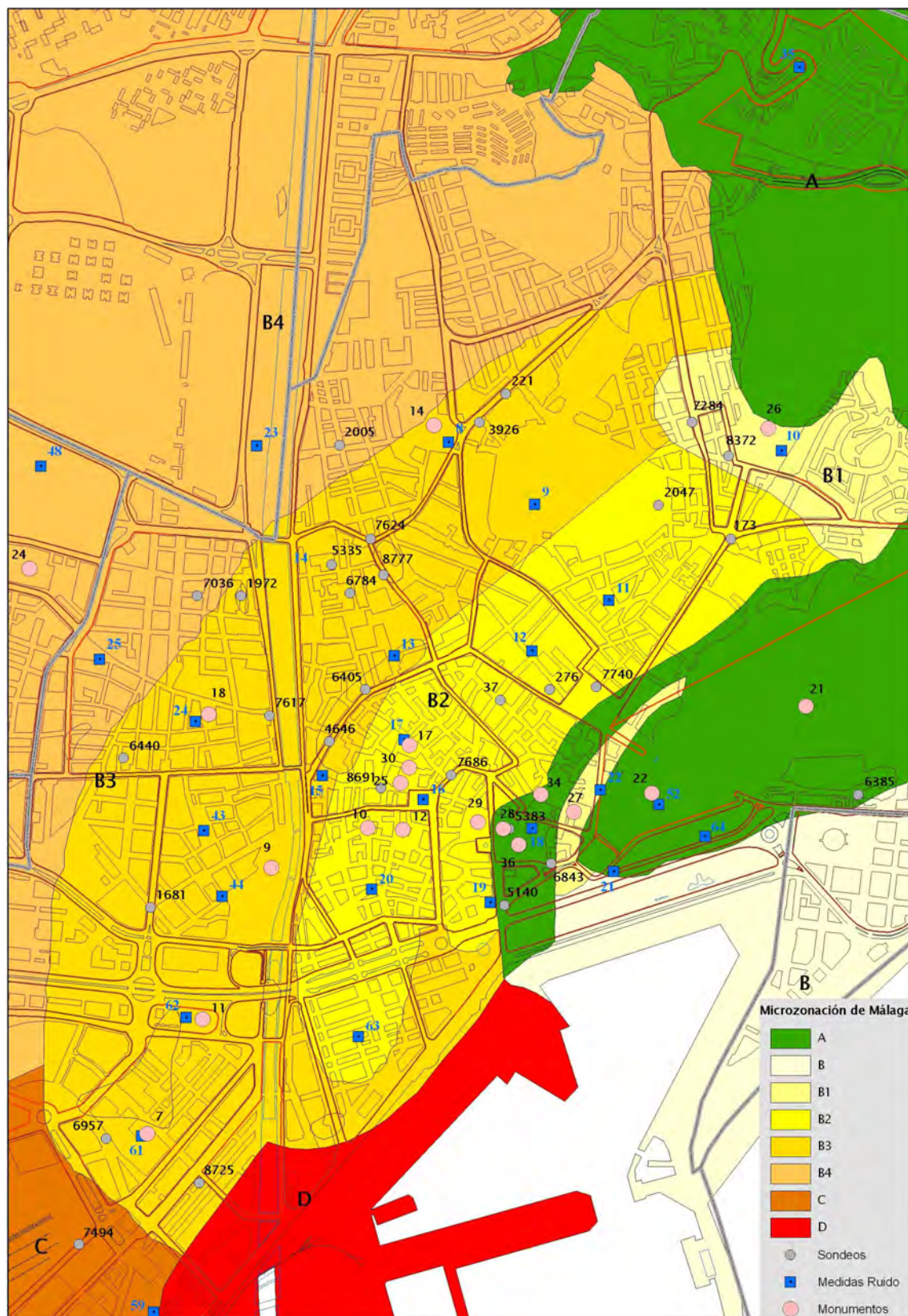


Figura 5.5. Microzonación del centro de Málaga y monumentos dañados en el terremoto de 1680. Las referencias de los monumentos corresponden a la tabla 5.5

Antes de aplicar el método de los índices de vulnerabilidad, se va a comprobar si, tras el sismo de 1680, los monumentos mostraron algún indicio de haber sufrido efectos locales del suelo. Esta comprobación se ha realizado para todos los monasterios y las iglesias con grado de daño asignado en 1680 (tablas 5.1a y 5.1b), al ser éstas las dos tipologías con mayor cantidad de edificios. En la figura 5.6 se representan los grados de daño asignados en 1680 a ambas tipologías frente a la frecuencia fundamental de la subzona a la que pertenecen. Se observa cómo no parece haber un claro efecto local del suelo en el caso de los monasterios, habiendo un amplio espectro de grados de daño para varias de las zonas. Sin embargo, en el caso de las iglesias sí se observa una clara distinción en los grados de daño de los edificios según las zonas de la microzonación a las que pertenecen. Las iglesias de las zonas B2 y B3 (de amplificaciones en intensidad +1.5 y +1.0, respectivamente), son las de mayores grados de daño que, si atendemos a los edificios asignados con calidades  $\alpha$  y  $\beta$ , tuvieron dos grados de daño más que las iglesias en roca. Esto ya indicaría que parece existir una influencia del tipo de suelo en los daños observados tras el terremoto de 1680.

### 5.3.2. Índices de vulnerabilidad de los monumentos de Málaga

Se ha aplicado la metodología propuesta por Lagomarsino *et al.* (2003), para el cálculo de los índices de vulnerabilidad de cada monumento según su tipología estructural y sus características específicas (número de plantas, estado de conservación, reformas realizadas, etc.). Se ha realizado una recopilación de información detallada de cada uno de estos monumentos, que comprende tanto guías de arquitectura como estudios arquitectónicos de monumentos concretos, de los edificios de la zona centro, etc. (García González *et al.*, 1987; Ayala, 1999; Rodríguez Marín, 2000; Candau *et al.*, 2005). Asimismo, se ha recurrido al juicio de expertos para corroborar los correctores del índice de vulnerabilidad obtenidos, para lo cual se realizaron diversas consultas con varios arquitectos técnicos de Málaga.

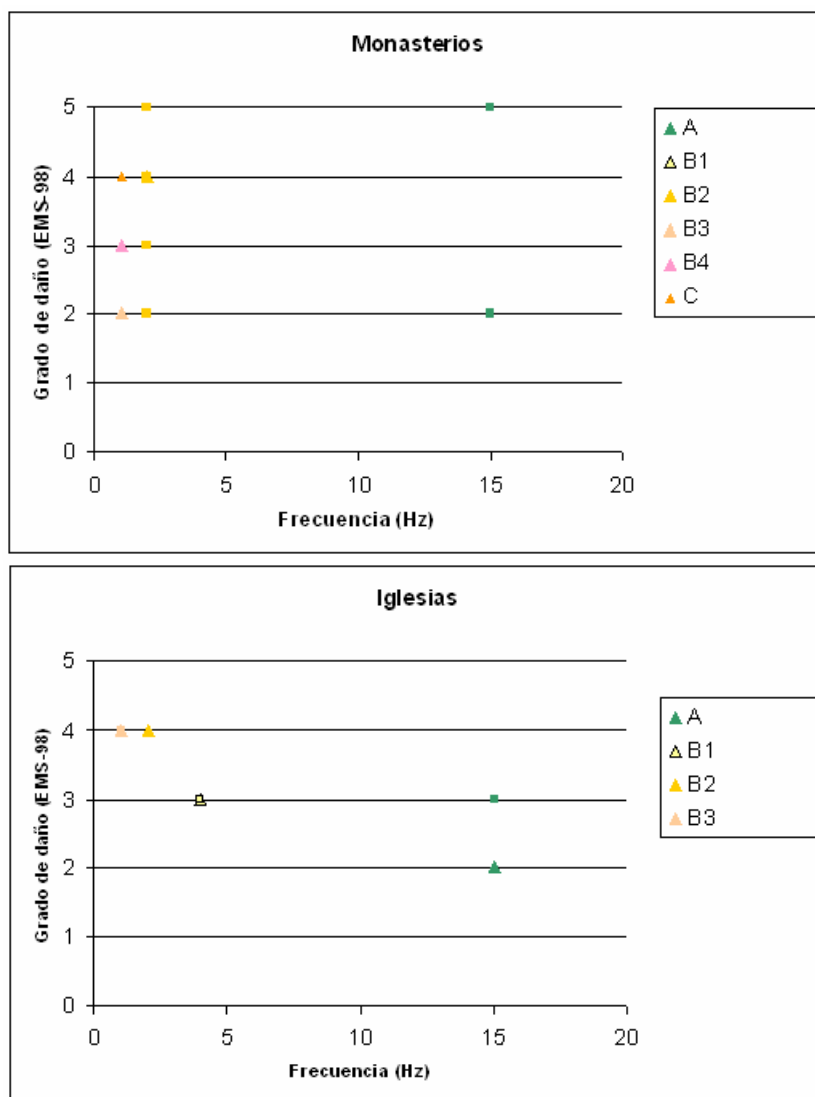


Figura 5.6. Grado de daño asignado en el sismo de 1680 frente a la frecuencia fundamental según la subzona, para los monasterios (arriba) y las iglesias (abajo), dañadas en 1680. Los triángulos representan los monumentos con calidades  $\alpha$  y  $\beta$ , y los cuadrados los evaluados con calidad  $\gamma$  (Goded, 2006)

En el anexo VII se detallan los modificadores de los índices de vulnerabilidad aplicados a cada uno de los monumentos estudiados, así como los índices de vulnerabilidad superior, medio e inferior finales de cada uno. Debe aclararse que se ha hecho una distinción en la forma de hallar estos correctores según la clase de monumento (tablas 5.2 y 5.4): en los monumentos de clase A, cuya tipología coincide con la que tenía en 1680, se han aplicado los correctores normalmente. Aquéllos que han cambiado su tipología respecto de la de 1680 (clase B), se han analizado con la tipología actual. Tal es el caso de los monasterios de los que sólo se conserva su iglesia. Deberá tenerse esto en cuenta cuando se comparen los resultados del estudio de vulnerabilidad con los daños observados en 1680, pues se estarán comparando

tipologías distintas. Por último, los monumentos de clase C, reconstruidos tras el sismo de 1680, son distintos edificios de los que había durante el sismo. Por ello, en estos casos no se aplicarán modificadores del índice de vulnerabilidad, manteniendo solamente el índice de vulnerabilidad debido a su tipología estructural. No debe olvidarse que en este capítulo se pretende validar la aplicación del método (basado en datos italianos), a la ciudad de Málaga, comparando los resultados obtenidos mediante esta metodología con los daños sufridos en un terremoto que afectó a la zona de estudio. Por ello se realizará una comparación básica de estos monumentos de clase C atendiendo a su tipología. Cuando se realice el estudio de los escenarios sísmicos de estos mismos edificios en el capítulo 6, sí se aplicarán los correctores del índice de vulnerabilidad, pues en ese caso se buscará saber qué ocurriría en el futuro, sin tener que realizar comparaciones con los edificios que existían en el pasado.

En la figura 5.7a se muestra la distribución de los monumentos estudiados según su índice de vulnerabilidad, utilizando los índices de vulnerabilidad inferior, medio y superior. Se observa cómo todos los edificios presentan un índice de vulnerabilidad medio entre 0.6 y 1.2, y un total de 8 de los 19 monumentos presentan un índice superior entre 1.2 y 1.4. Por otro lado, en la figura 5.7b se han representado los índices de vulnerabilidad de cada monumento sobre el plano de la ciudad, donde se observa que la mayoría de los edificios más vulnerables se encuentran en las cercanías del río Guadalmedina.

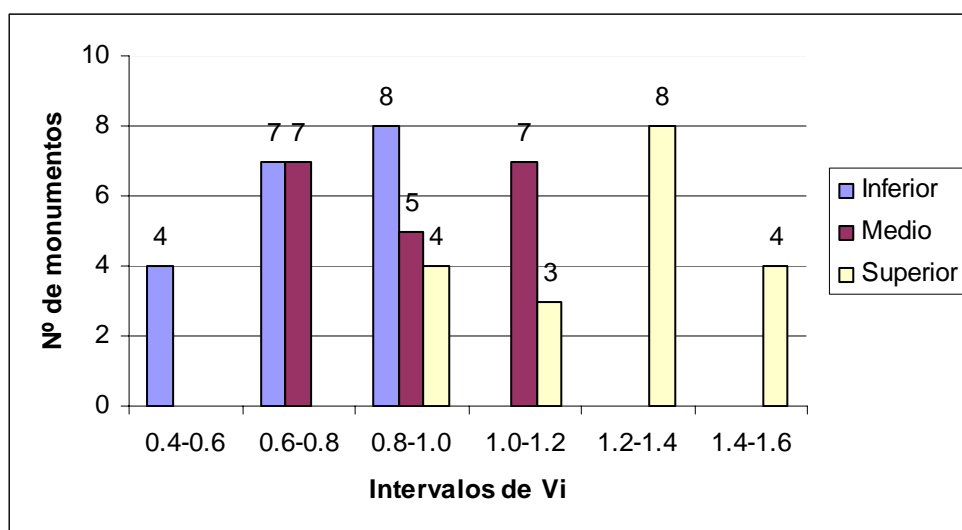


Figura 5.7a. Clasificación de los monumentos según su índice de vulnerabilidad



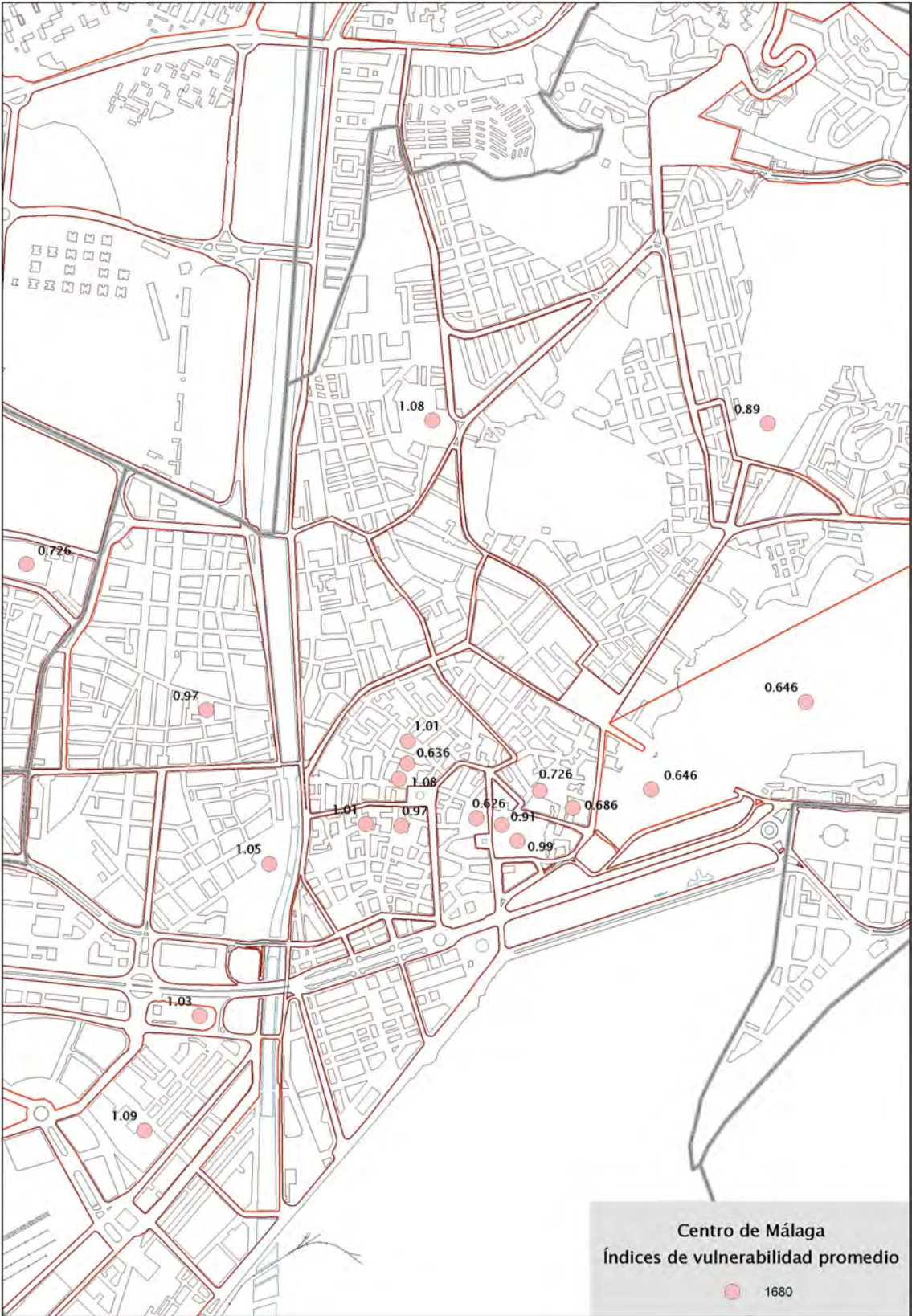


Figura 5.7b. Distribución de los índices de vulnerabilidad de los monumentos sobre el plano de la ciudad de Málaga

### 5.3.3. Curvas de vulnerabilidad por tipologías

Una vez hallados los índices de vulnerabilidad de los monumentos, se han obtenido sus curvas de vulnerabilidad, aplicando la función de vulnerabilidad  $\mu_d$  (ecuación 3.35). En dichas curvas se representa el grado de daño promedio  $\mu_d$  frente a la intensidad  $I$ , conocidos el índice de vulnerabilidad  $V_I$  de cada edificio y el parámetro  $\phi$ , que viene dado según la tipología del mismo.

La idea es comparar los resultados derivados de la aplicación de esta metodología con los daños observados en el terremoto de Málaga de 1680. Para ello, se representan en una misma gráfica las curvas de vulnerabilidad de los monumentos, el grado de daño asignado a ese monumento por Goded (2006) en el sismo de 1680, y la intensidad que debió sentir el edificio corregida por los efectos locales del suelo, de acuerdo con la microzonación obtenida en este estudio (figuras 5.8a a 5.8d).

Se han obtenido las curvas de vulnerabilidad para cada una de las cuatro tipologías de monumentos que se tienen: iglesias, monasterios, castillos y palacios. No se han aplicado correctores del índice de vulnerabilidad, ya que se está representando el comportamiento general de cada tipología. Por ello, además de los monumentos que existen en la actualidad, se han añadido los monumentos que han desaparecido desde 1680, pues se trata de comprobar la eficacia del método con la mayor cantidad posible de información. En las figuras 5.8a a 5.8d se representan las curvas de vulnerabilidad para las 4 tipologías estructurales, aplicando los efectos de suelos. Dado que cada tipología presenta tres valores del índice de vulnerabilidad (inferior, medio y superior), para cada tipología se representan tres curvas de vulnerabilidad.

En el caso de las iglesias (figura 5.8a), puede observarse la buena correlación entre las curvas de vulnerabilidad y los daños en 1680. Todas las iglesias se encuentran dentro de los intervalos delimitados por las curvas superior e inferior. Además, los daños en 1680 se encuentran muy próximos a la curva media. En el caso de los monasterios (figura 5.8b), existe una mayor dispersión en los datos. Sin embargo, los 3 monasterios que se encuentran fuera de las tres curvas corresponden a edificios evaluados con calidad  $\gamma$  (baja) en la asignación del daño (tabla 5.5), por lo que estas medidas están afectadas por una incertidumbre importante.

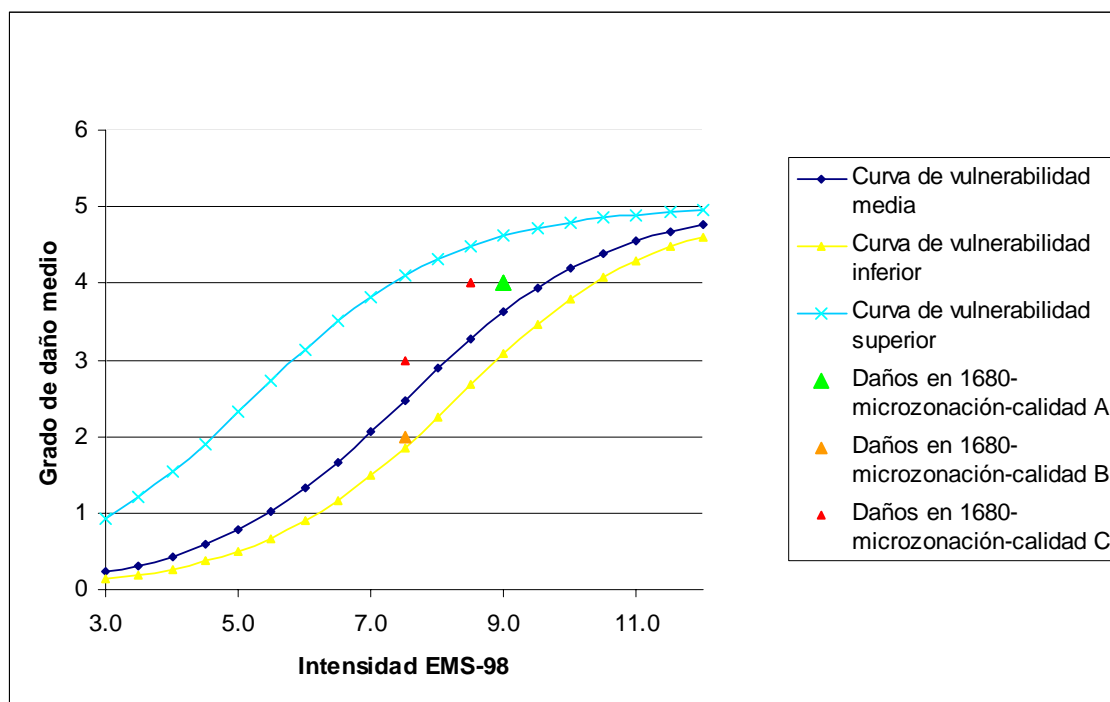


Figura 5.8a. Curvas de vulnerabilidad para las iglesias y comparación con los daños en 1680

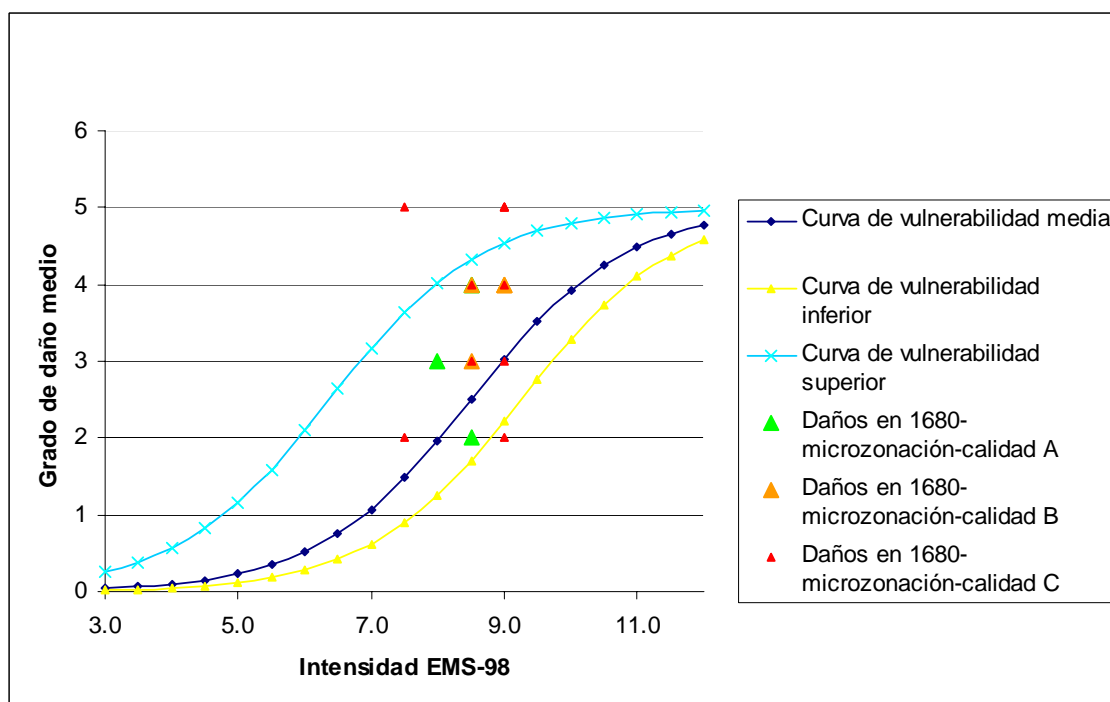


Figura 5.8b. Curvas de vulnerabilidad para los monasterios y comparación con los daños en 1680

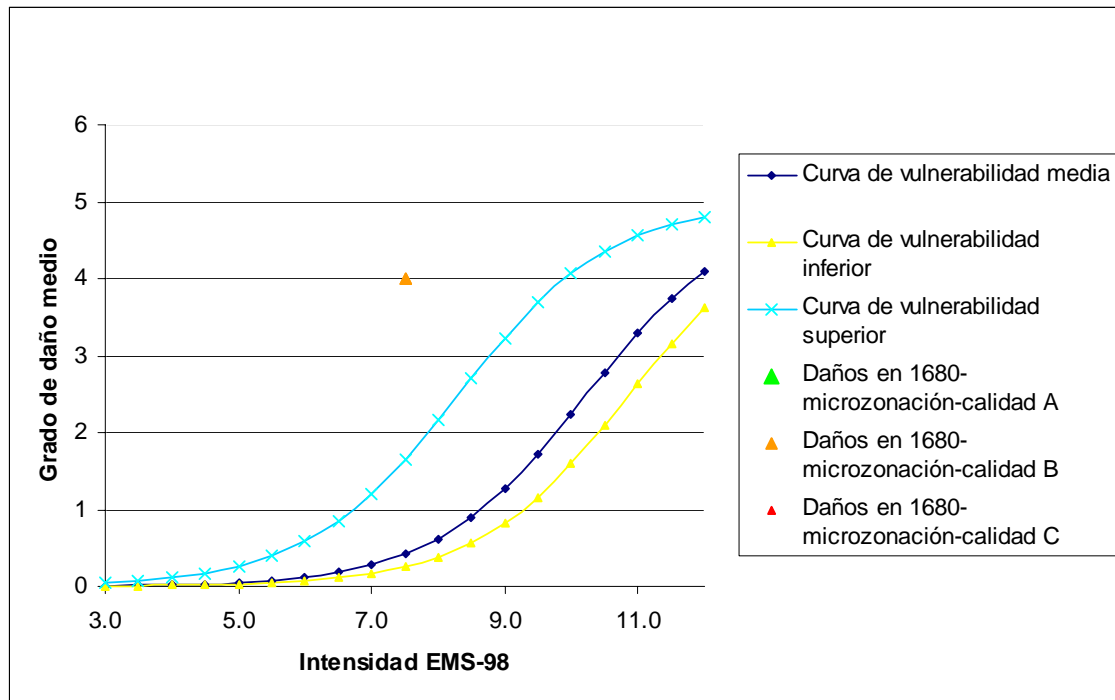


Figura 5.8c. Curvas de vulnerabilidad para los castillos y comparación con los daños en 1680

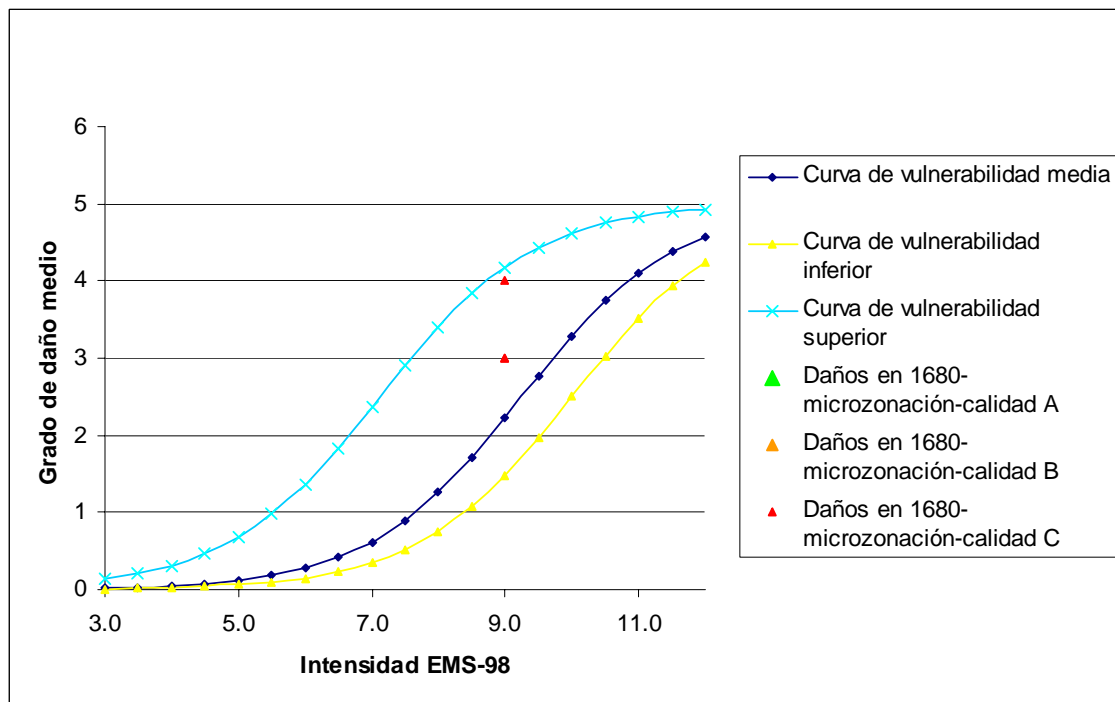


Figura 5.8d. Curvas de vulnerabilidad para los palacios y comparación con los daños en 1680



Los daños sufridos por los dos castillos de Málaga (figura 5.8c), no se ajustan a sus curvas de vulnerabilidad, existiendo una diferencia de más de tres grados entre el grado de daño medio esperado y el observado en 1680. Parecen ser castillos mucho más vulnerables de lo esperado. Esperaremos a ver qué sucede con las curvas de vulnerabilidad individuales de estos edificios para tratar de explicar a qué puede ser debida esta falta de ajuste. Los pocos palacios que se tienen (figura 5.8d), presentan un peor ajuste que las iglesias, pero sin embargo se encuentran dentro de los intervalos de incertidumbre dados por las curvas de vulnerabilidad, a pesar de estar todos ellos evaluados con calidad  $\gamma$  (o C).

Por tanto se puede concluir que, salvo para los dos castillos de la ciudad, existe un buen acuerdo entre la metodología de los índices de vulnerabilidad y los daños observados, en las curvas de vulnerabilidad por tipologías de los monumentos de Málaga, especialmente en el caso de las iglesias. Debe recordarse que en esta metodología el análisis estadístico para obtener la función de vulnerabilidad adecuada se realizó básicamente en la tipología de las iglesias, por lo que se va a observar en especial su comportamiento para comprobar la validez de la aplicación de esta metodología a los edificios malagueños.

A continuación se va a estudiar cómo afecta la microzonación propuesta a las curvas de vulnerabilidad. En la figura 5.9 se han representado las curvas de vulnerabilidad para las iglesias considerando la microzonación propuesta en este estudio (figura 5.9a), sin considerar los efectos del suelo (figura 5.9b), y considerando una microzonación simplificada suelo/roca (figura 5.9c).

Se observa cómo los resultados mejoran claramente al aplicar los efectos locales del suelo (a), pues tanto al aplicar la microzonación como la división de la ciudad en dos zonas (c), los resultados se encuentran confinados dentro de los límites de las incertidumbres dadas por las curvas de vulnerabilidad. No se aprecian grandes diferencias entre la aplicación de una microzonación simplificada en dos zonas, o la de seis zonas obtenida en este estudio, aunque sí hay algún monumento de calidad  $\alpha$  (elevada), más cercano a la curva promedio en el segundo caso. Se volverán a realizar estas comparaciones en el apartado siguiente, con las curvas de vulnerabilidad individuales. Sin embargo, ya parece observarse unos mejores resultados al aplicar efectos locales del suelo.

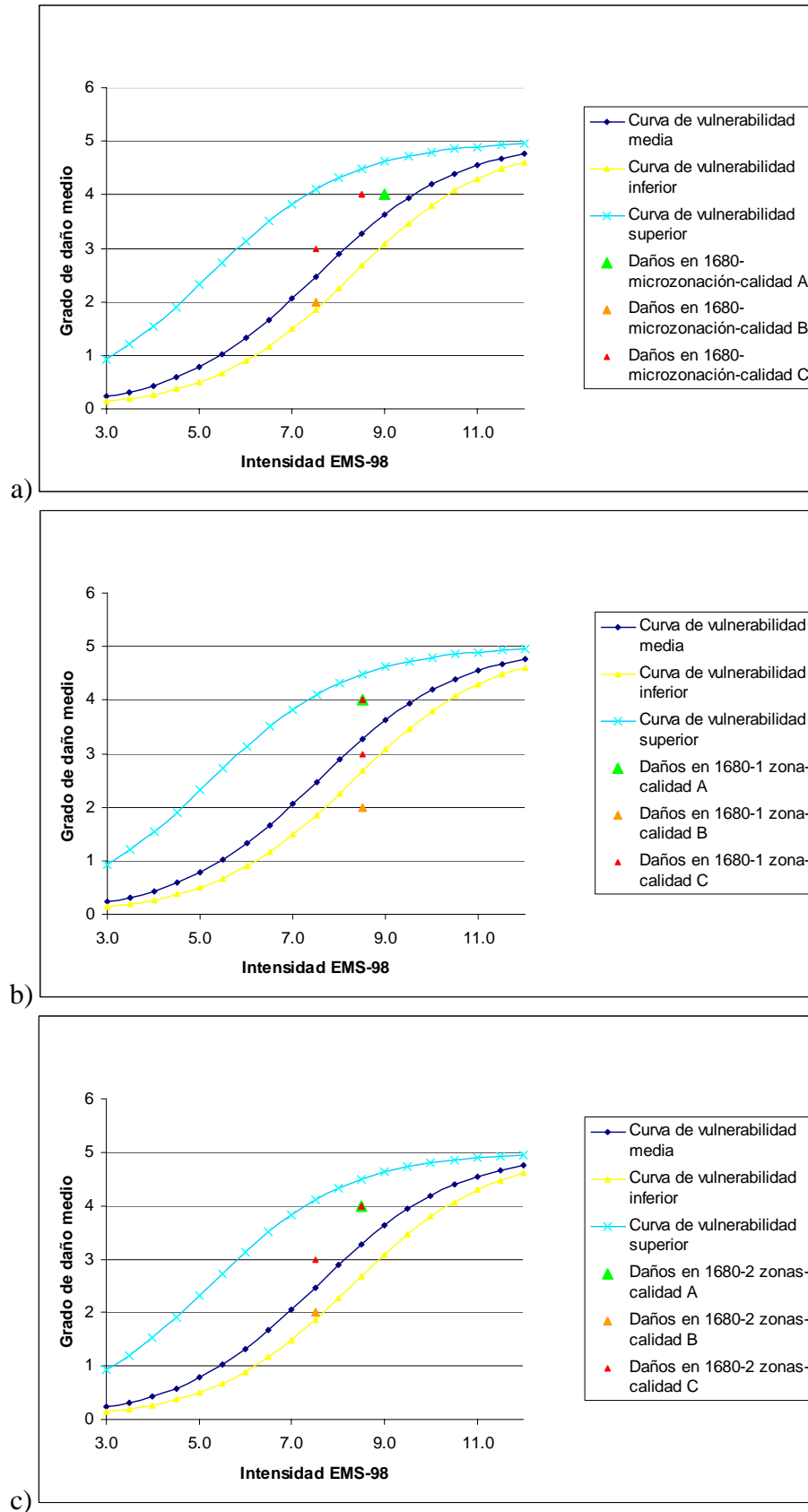


Figura 5.9. Curvas de vulnerabilidad de las iglesias de Málaga y comparación con los daños en 1680: con la microzonación propuesta (a), sin efectos de suelo (b), y con una microzonación dividida en roca y suelo (c). Los monumentos de 1680 se muestran con distinto color según la calidad asignada al grado de daño

Por último, se ha querido analizar el efecto de utilizar en la microzonación los acelerogramas de entrada en roca IM1 (a partir de registros *strong-motion* europeos), e IM2 (método *EGF*), cuya pérdida de altas frecuencias hacía que se tomaron los resultados con cautela. En las figuras 5.10a y 5.10b se muestran las curvas de vulnerabilidad para las iglesias y los monasterios, a partir de las microzonaciones con IM1 e IM2. Aparentemente no parece haber grandes diferencias entre ambas microzonaciones; sin embargo, en la microzonación utilizando IM2 empeoran los resultados en los monumentos con calidad  $\alpha$ , quedando uno incluso fuera de las curvas de vulnerabilidad en el caso de los monasterios. Debe hacerse notar que los resultados para las iglesias con IM2 (figura 5.10b), son iguales que utilizando la microzonación en dos zonas (figura 5.9 inferior). Por tanto, la microzonación con IM2 es parecida a la microzonación simplificada en dos zonas con IM1. Esto es probablemente debido a las diferencias en las amplificaciones en términos de intensidad de las zonas B2 y B3 utilizando IM1 o IM2, donde se encuentran la mayoría de los monumentos. En conclusión, puede decirse, al menos, que los resultados no mejoran al aplicar la microzonación alternativa utilizando IM2 como acelerograma de entrada en roca en *ProShake*.

#### 5.3.4. Curvas de vulnerabilidad individuales

En este apartado se presentan y analizan las curvas de vulnerabilidad individuales de cada uno de los 19 monumentos estudiados (figuras 5.11a a 5.11e). Para ello, se han utilizado índices de vulnerabilidad específicos de cada uno de ellos en función de sus características particulares. Las curvas de vulnerabilidad se representan junto con los daños observados en 1680, de acuerdo con la intensidad que afectó a cada uno de ellos, del mismo modo que en el apartado anterior. Se representan de forma conjunta los daños observados con efectos de suelos, sin ellos, y con la microzonación simplificada en dos tipos de suelos. Con un asterisco se indican los monumentos que han cambiado de tipología desde 1680 (clase B, \*), y los que son distintos que los del siglo XVII, por haberse reconstruido totalmente (clase C, \*\*), pues es un factor a tener en cuenta a la hora de realizar la comparación con los daños observados en el pasado.

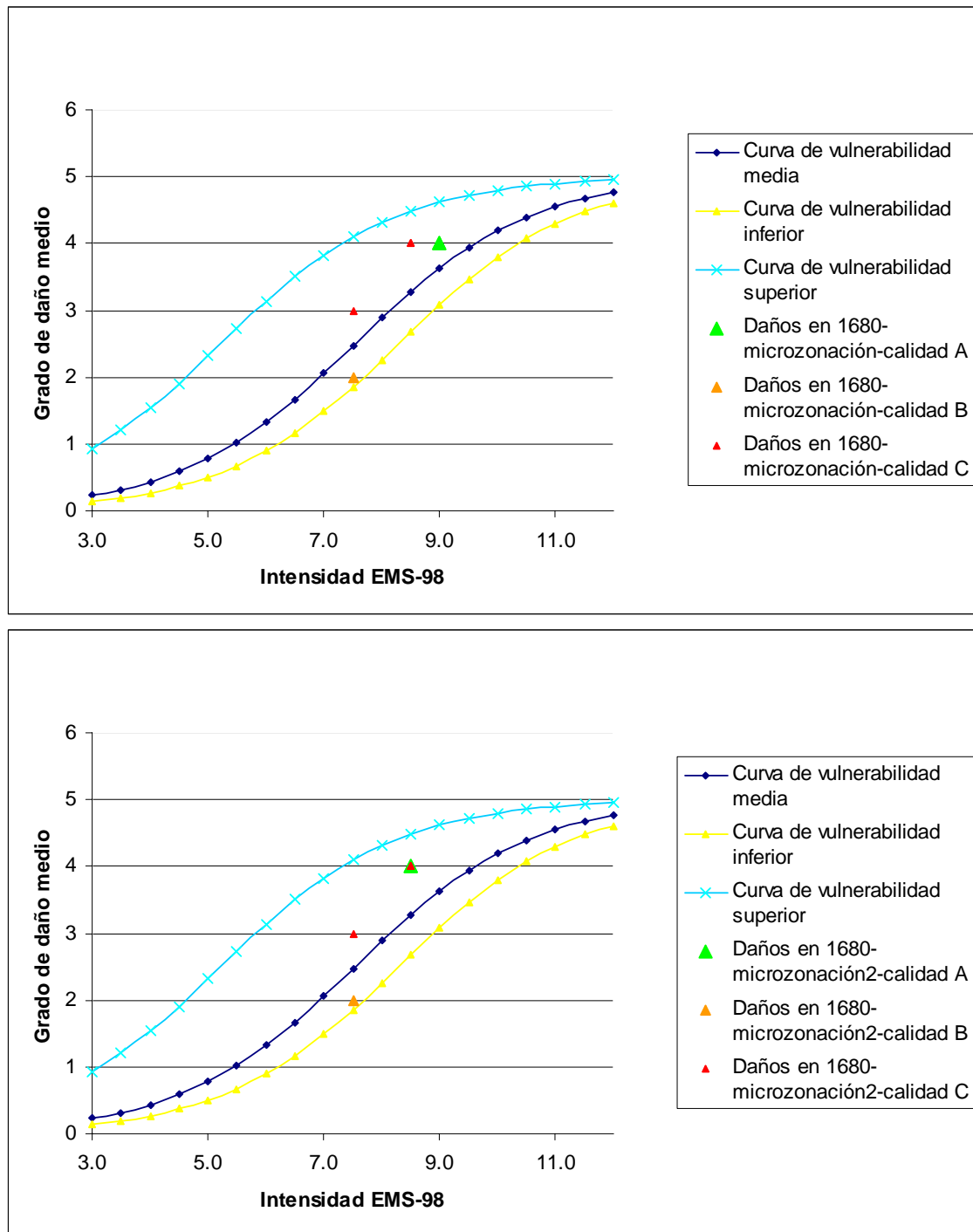


Figura 5.10a. Curvas de vulnerabilidad de las iglesias de Málaga y comparación con los daños en 1680, utilizando los acelerogramas IM1 (superior), e IM2 (inferior). Los monumentos de 1680 se muestran con distinto color según la calidad asignada al grado de daño

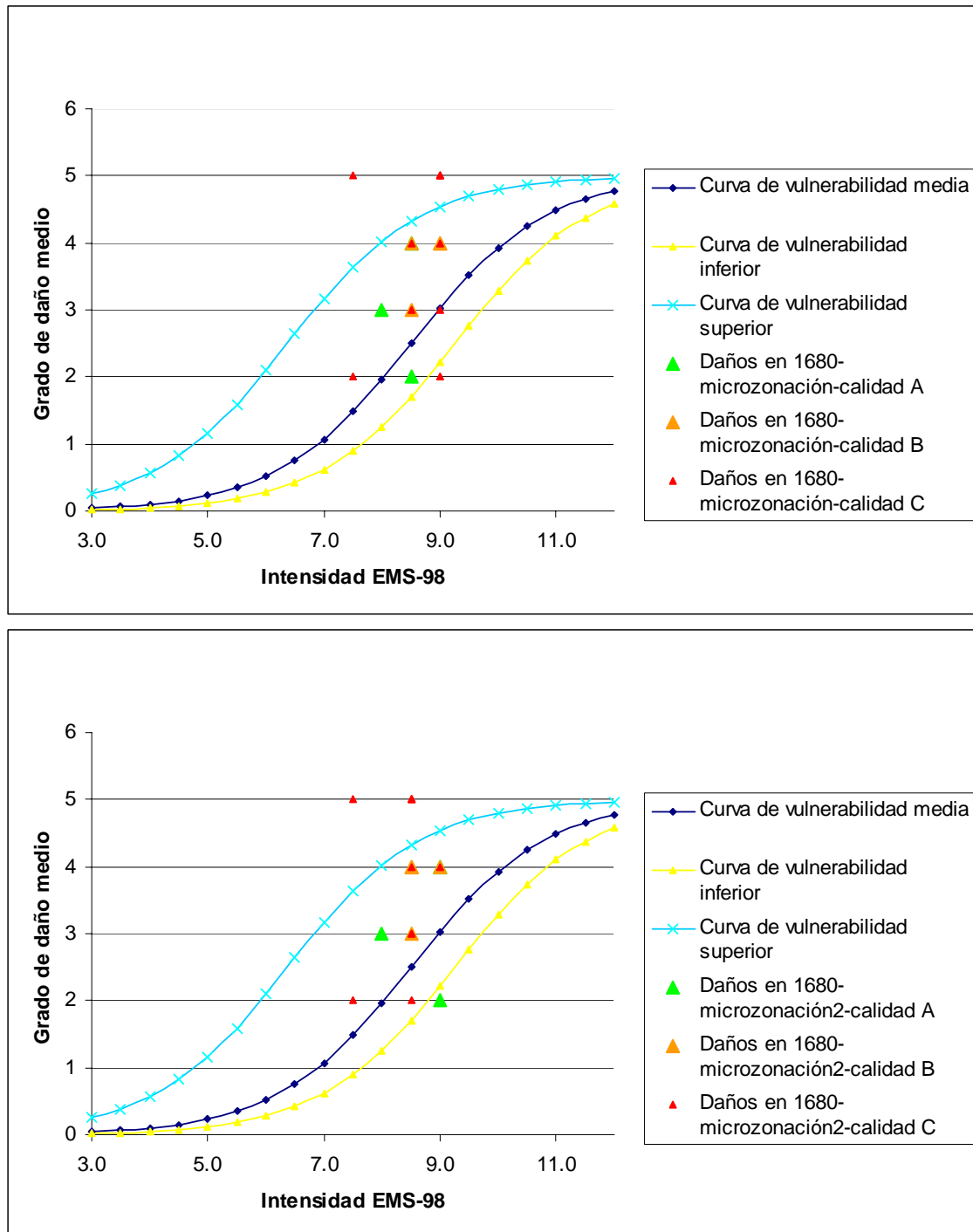


Figura 5.10b. Curvas de vulnerabilidad de los monasterios de Málaga y comparación con los daños en 1680, utilizando los acelerogramas IM1 (superior), e IM2 (inferior). Los monumentos de 1680 se muestran con distinto color según la calidad asignada al grado de daño

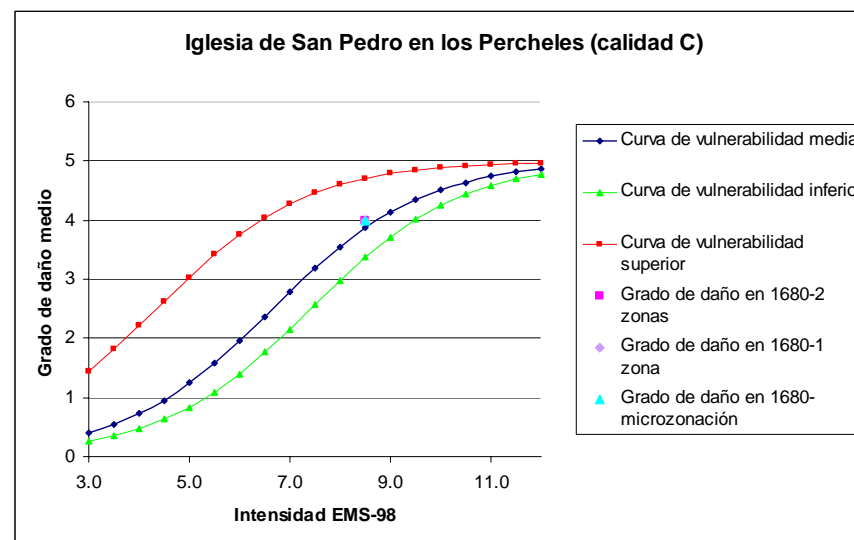
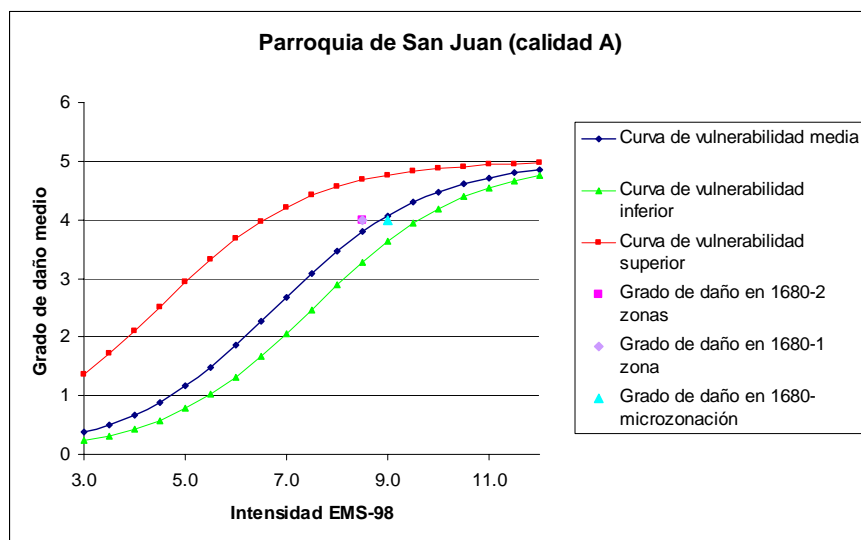
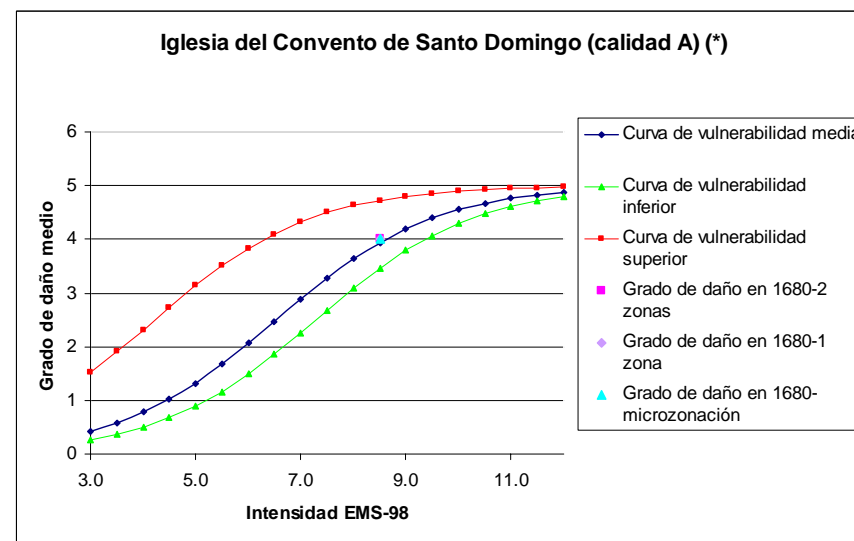
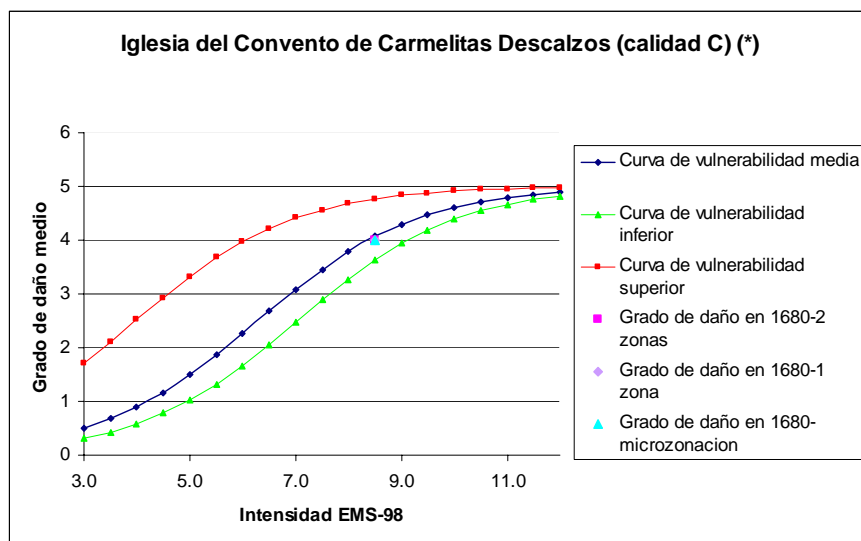


Figura 5.11a. Curvas de vulnerabilidad individuales de las iglesias y comparación con los daños en 1680 (1). El símbolo fucsia representa la microzonación en dos zonas, el violeta el caso sin microzonación y en azul con las seis subzonas propuestas

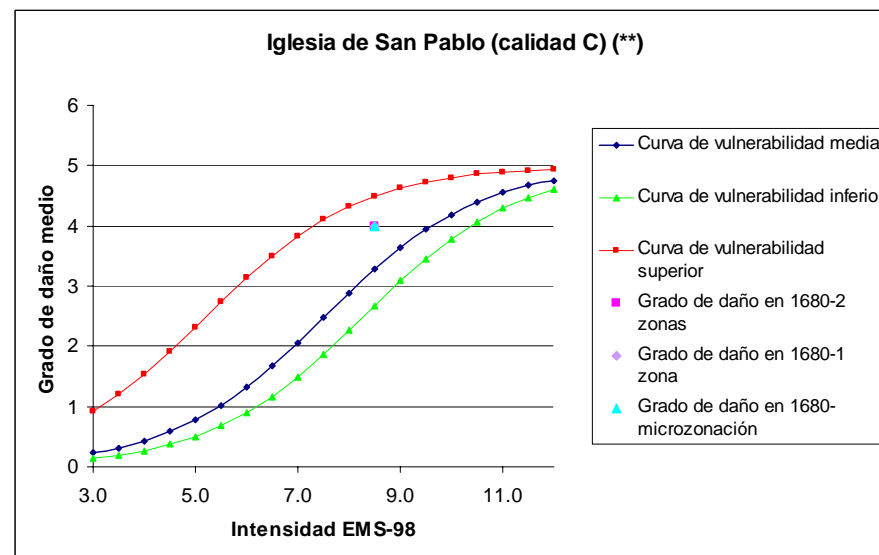
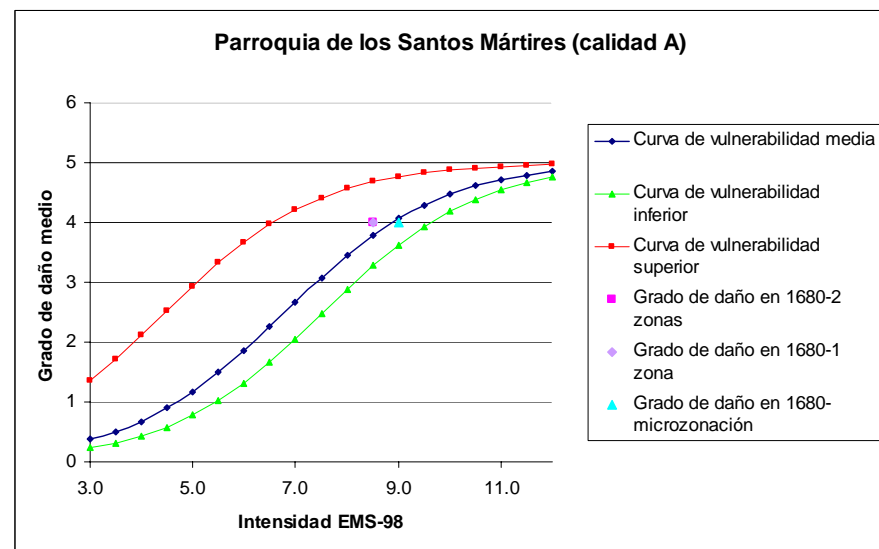
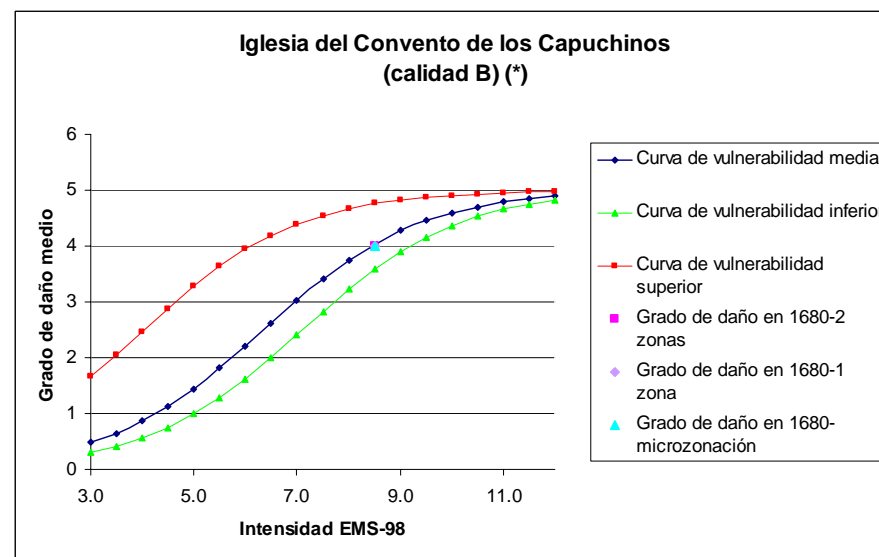
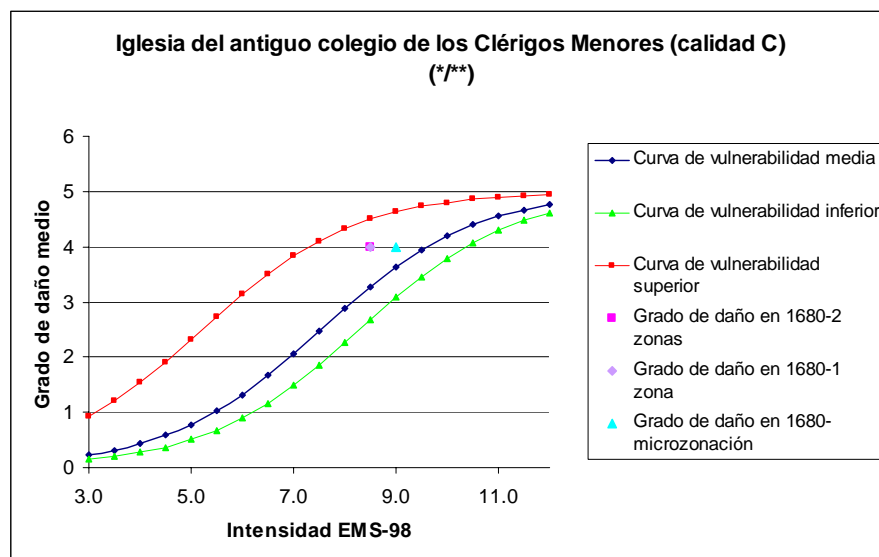


Figura 5.11b. Curvas de vulnerabilidad individuales de las iglesias y comparación con los daños en 1680 (2). Los símbolos igual que en la figura 5.11a

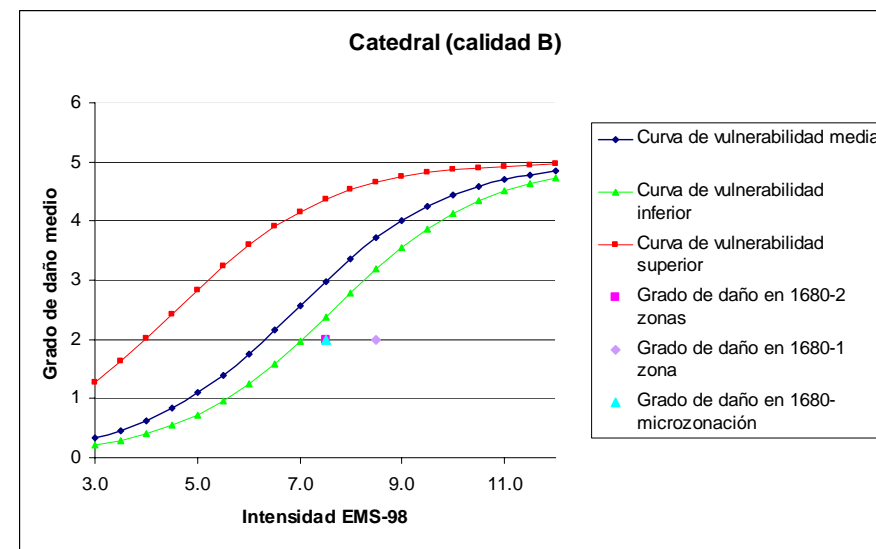
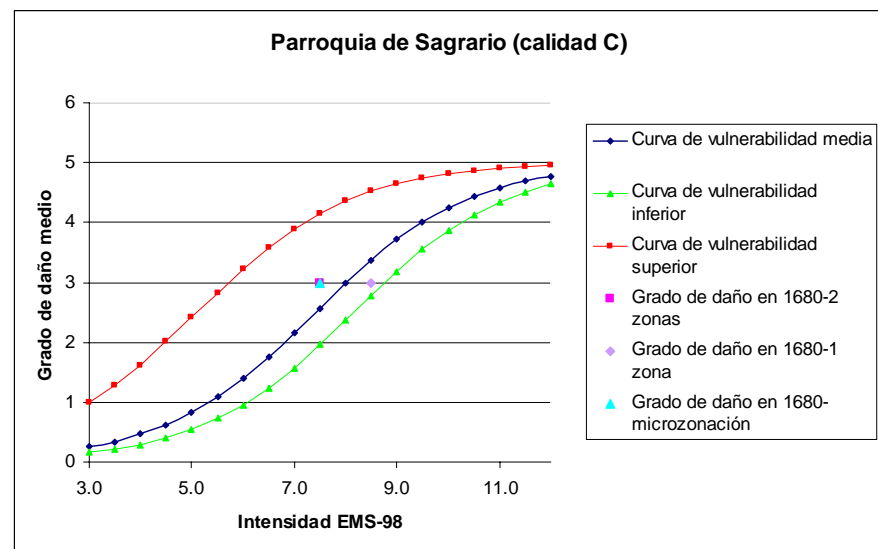
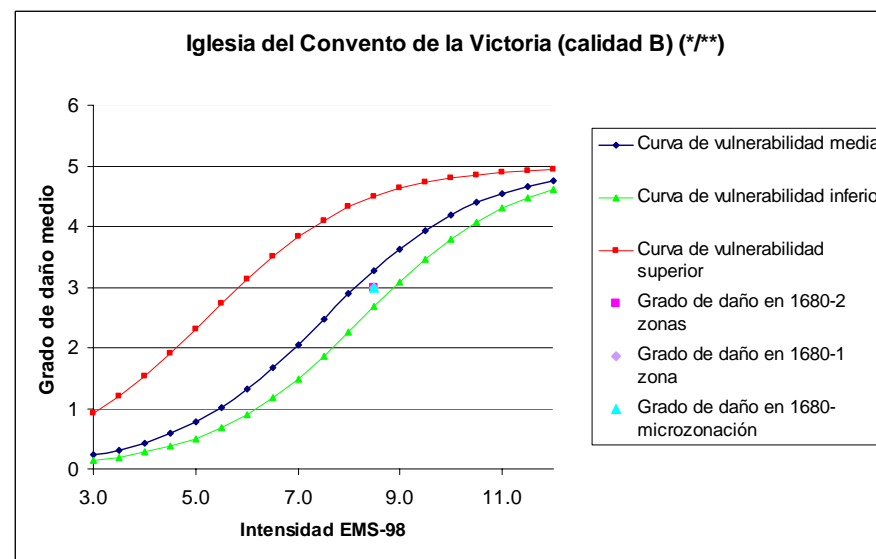
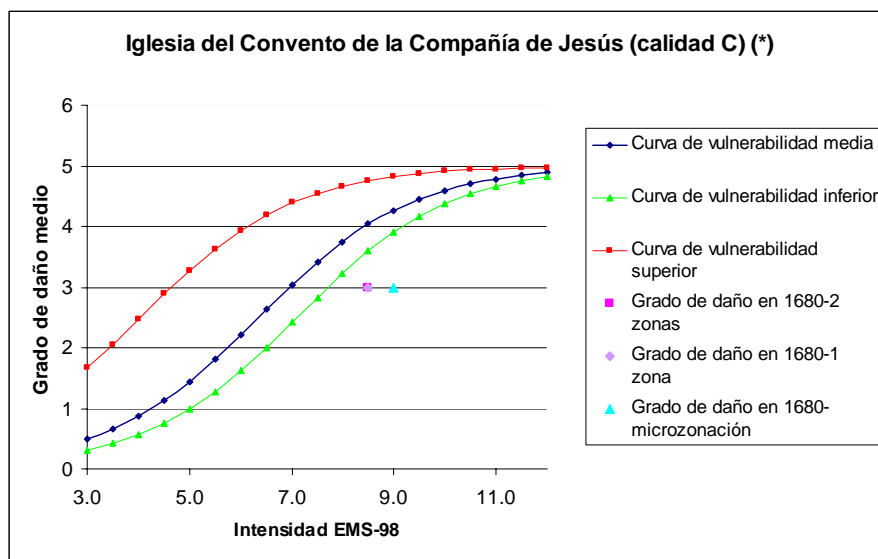


Figura 5.11c. Curvas de vulnerabilidad individuales de las iglesias y comparación con los daños en 1680 (3). Los símbolos igual que en la figura 5.11a



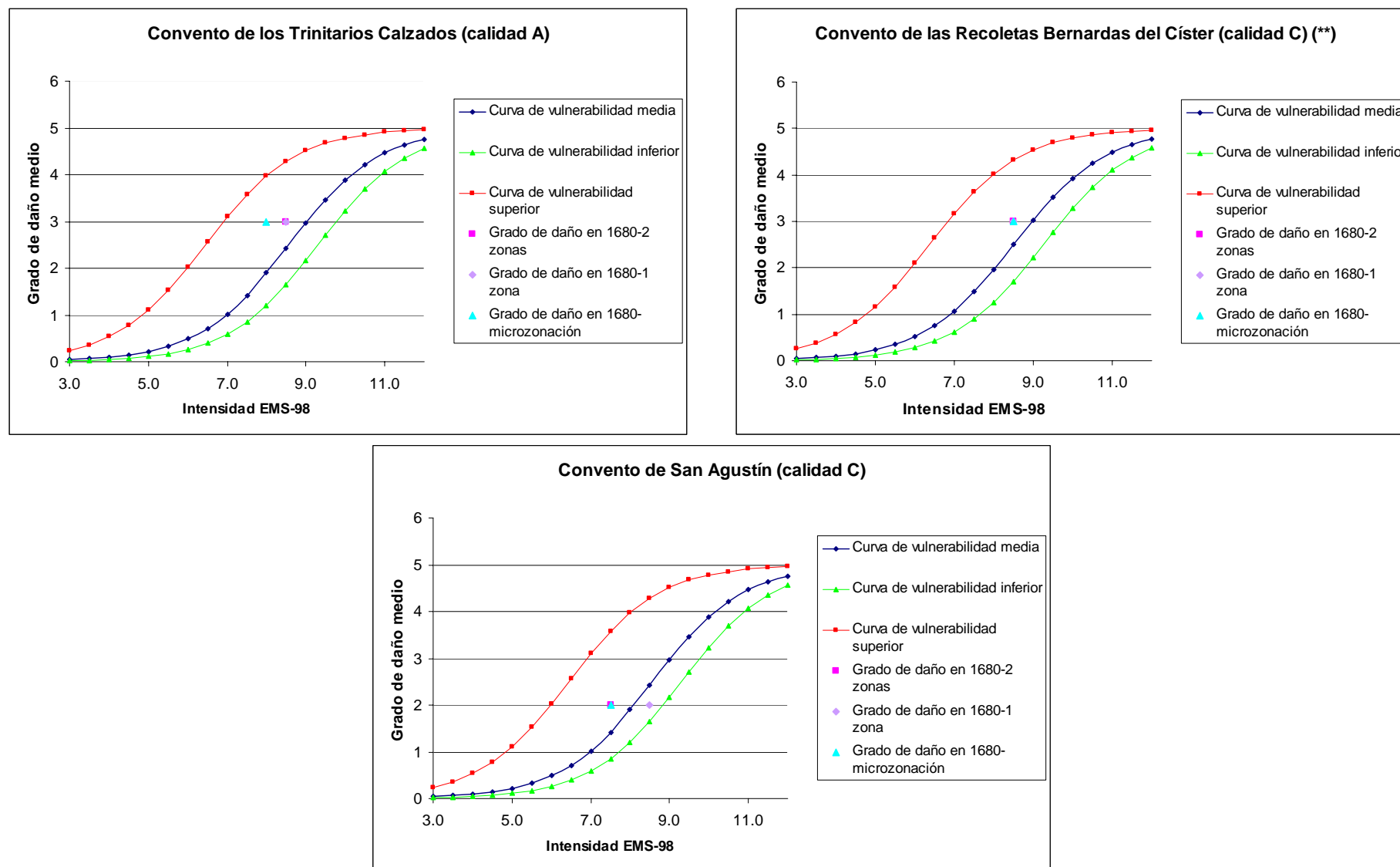


Figura 5.11d. Curvas de vulnerabilidad individuales de los monasterios y comparación con los daños en 1680. Los símbolos igual que en la figura 5.11a

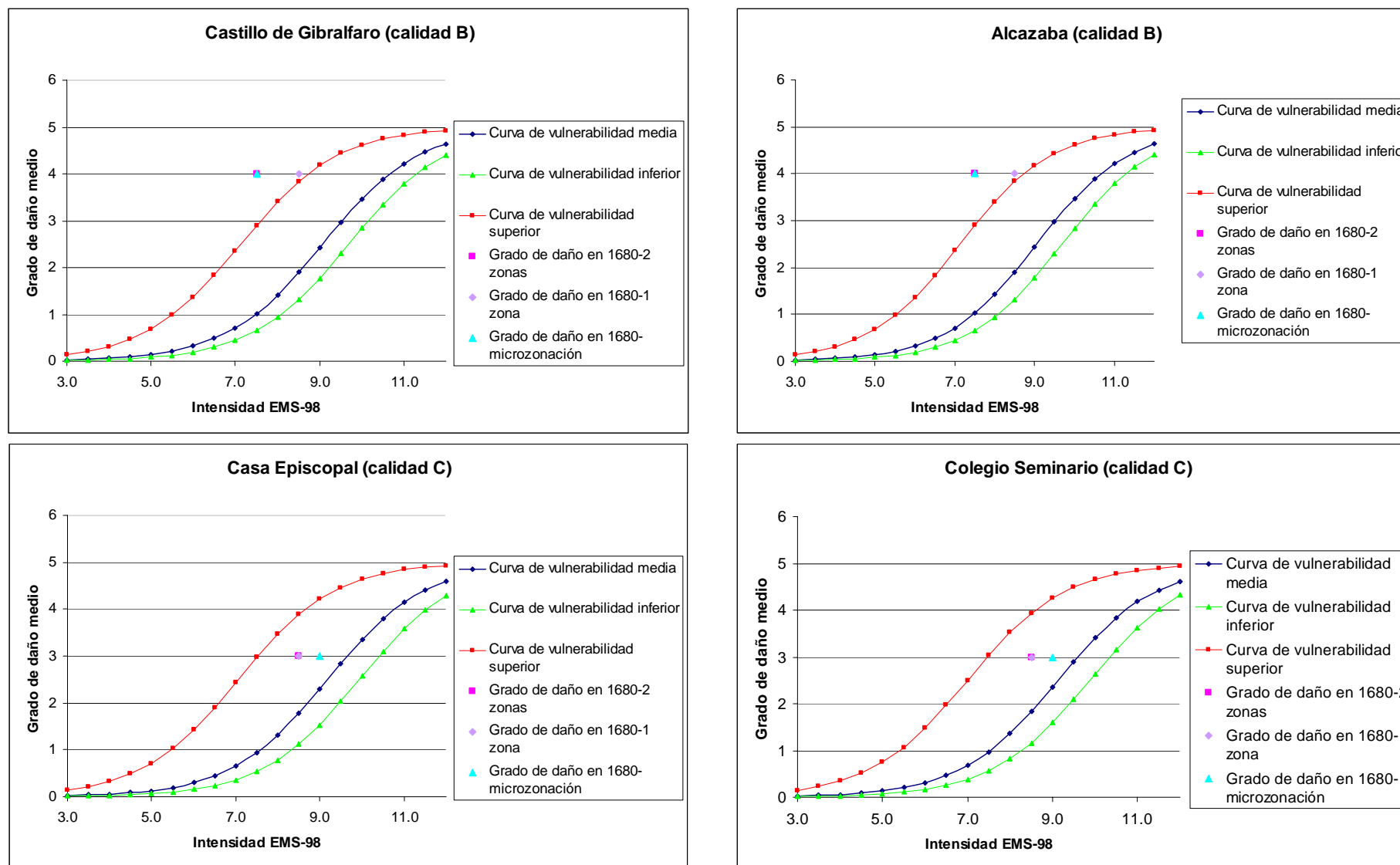


Figura 5.11e. Curvas de vulnerabilidad individuales de castillos (superior), y palacios (inferior), y comparación con los daños en 1680. Los símbolos igual que en la figura 5.11a

Del análisis de las figuras 5.11 se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- En el caso de las iglesias existe un buen ajuste entre los resultados del método de los índices de vulnerabilidad y los daños observados en el terremoto de 1680. Cuando se aplica la microzonación propuesta para el centro de Málaga en este estudio, en cinco de las doce iglesias estudiadas los resultados mejoran respecto del caso en que no se aplican efectos de suelo. Al aplicar efecto de sitio, en 6 iglesias existe un buen ajuste entre los daños observados y la curva de vulnerabilidad promedio, y en otras 3 ambos resultados son muy similares. Solamente hay 3 iglesias en las que los resultados de las curvas no se corresponden con los daños observados: las iglesias de San Pablo, la Compañía de Jesús y la Catedral. Debe tenerse en cuenta que existen varias fuentes de incertidumbre: desde la evaluación de los grados de daño en 1680 (a partir de información histórica de diversas fuentes), a la aplicación de una metodología basada en datos italianos a una ciudad española. Debe hacerse notar que algunas de las iglesias en las que hay una completa coherencia entre ambos resultados han cambiado de tipología desde 1680 (como las iglesias de Santo Domingo y los Capuchinos), o fueron evaluadas con calidad  $\gamma$  (San Pedro en los Percheles), o incluso presentan ambas incertidumbres, provenientes tanto de los daños de 1680 como del cambio de tipología al utilizar el método de Lagomarsino *et al.* (2003), como es el caso de la iglesia del convento de los Carmelitas Descalzos.
- Independientemente de que se utilice una microzonación en dos o seis zonas o ninguna, en la iglesia de San Pablo los daños observados no se ajustan a las curvas de vulnerabilidad, aunque se mantienen dentro de la incertidumbre dada por las mismas. La explicación podría deberse a que se trata de una iglesia distinta de la que había en 1680, pues fue construida en el siglo XIX en el emplazamiento de la anterior (tabla 5.2), lo que explicaría por qué no se obtienen tan buenos resultados.
- La iglesia del convento de la Compañía de Jesús presenta unos daños esperados mayores de los observados en 1680, que se sitúan fuera de las curvas de vulnerabilidad y habiendo una diferencia de más de un grado. Esto puede explicarse por el hecho de que se trata de una iglesia de clase B, cuya tipología

pasó de monasterio (M) en 1680 a iglesia (I) en la actualidad. Las iglesias son más vulnerables que los monasterios (su índice de vulnerabilidad es mayor que el de las demás tipologías). Esto explicaría por qué, al haber pasado a tipo I, se esperan daños mayores en este monumento. Se trata del único monumento que ha cambiado de tipología y cuyos resultados no son satisfactorios. Tras este análisis se plantea la posibilidad de utilizar la tipología M para este monumento.

- En la catedral de Málaga tampoco se obtienen buenos resultados. En ella los daños esperados si ocurriera un sismo como el de 1680 son un grado mayores que los observados. En este caso no existe un cambio de tipología ni de edificio que pueda justificar dichos resultados. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que se ha utilizado una tipología de “iglesias” a este monumento, cuando se trata de una catedral, en general de construcción mucho más robustas que las iglesias. Se piensa que la tipología I clasificada por Lagomarsino *et al.* (2003), se refiere a iglesias normales (más comunes), y no a catedrales, que deberían tener una tipología distinta. Lo que está claro es que la catedral de Málaga es menos vulnerable de lo que puede esperarse si se la considera con la tipología de iglesia.
- Los resultados para los monasterios se encuentran dentro de los límites de incertidumbre de las curvas. Sin embargo, el ajuste no es tan bueno como en el caso de las iglesias. Además, no parece haber una mejoría al aplicar efectos de suelo, siendo incluso mejores los resultados al no considerar efectos de suelo en el caso del convento de Trinitarios Calzados (calidad  $\alpha$ ). Sin embargo, se recuerda que la metodología para los monasterios está basada en pocos datos de campo, por lo que es menos fiable que los parámetros dados en las iglesias.
- En los castillos los resultados no son nada satisfactorios. En ellos, los daños esperados son 3 grados menores que los observados en 1680, lo que constituye un completo desajuste entre el método aplicado y los daños observados. Estas diferencias podrían ser debidas a la tipología de castillos dada por Lagomarsino *et al.* (2003). Es posible que los parámetros para esta tipología se hayan basado en los datos de castillos más modernos, por ejemplo de los siglos XV-XVII, de mayor presencia en Italia. Los dos castillos de Málaga son de época musulmana contruidos en el siglo XI, probablemente con materiales más pobres que los

castillos italianos en que se han basado los parámetros aplicados. Un castillo hasta cuatro siglos más antiguo y construido con peores materiales, es, lógicamente, bastante más vulnerable de lo esperado.

- Por último, en los palacios los resultados son buenos, aunque no hay un grado de ajuste tan elevado como en la mayoría de las iglesias. Sin embargo, sí hay un resultado importante en esta categoría: en los dos palacios analizados, la aplicación de efectos locales del suelo mejora significativamente los resultados respecto de la no aplicación de efectos de suelo o la aplicación de una microzonación simplificada suelo/roca.

Como consecuencia de estos resultados, se ha planteado si, para la iglesia del convento de la Compañía de Jesús, los resultados podrían mejorar al considerar la tipología M de 1680 en lugar de la tipología I actual. Lógicamente, no se han aplicado correctores del índice  $V_I$  en este caso, pues el monasterio hace tiempo que desapareció, y no se tiene información de este edificio, sino sólo de su iglesia actual, como se ha comentado anteriormente. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.12. Se puede apreciar cómo los resultados mejoran al considerar la antigua categoría M para este monumento. Es decir, un monasterio ubicado en esa subzona presentaría un grado de daño esperado 3, que es el que tuvo en 1680. Al considerar la iglesia actual, más vulnerable, las curvas dejan de ajustarse a los daños observados, como ya se preveía. Al considerarlo un monasterio, se estaría hablando de un edificio que ya no existe, y no se estarían utilizando las características específicas del edificio actual. Solamente se realiza este tratamiento para comprender la importancia del cambio de tipología en la comparación de los resultados.

En resumen, puede concluirse que la metodología de los índices de vulnerabilidad propuesta por Lagomarsino *et al.* (2003) se ajusta bastante bien a los monumentos de Málaga, en especial a las iglesias, aunque no ocurre lo mismo con la Catedral, que debería clasificarse mediante otra tipología. En el caso de los castillos, la metodología tampoco se ajusta, posiblemente debido a su antigüedad comparada con los datos analizados en Italia. Al aplicar la nueva microzonación del centro de Málaga desarrollada en este estudio mejoran los resultados, especialmente en las iglesias, de acuerdo con los daños observados en el sismo de 1680.

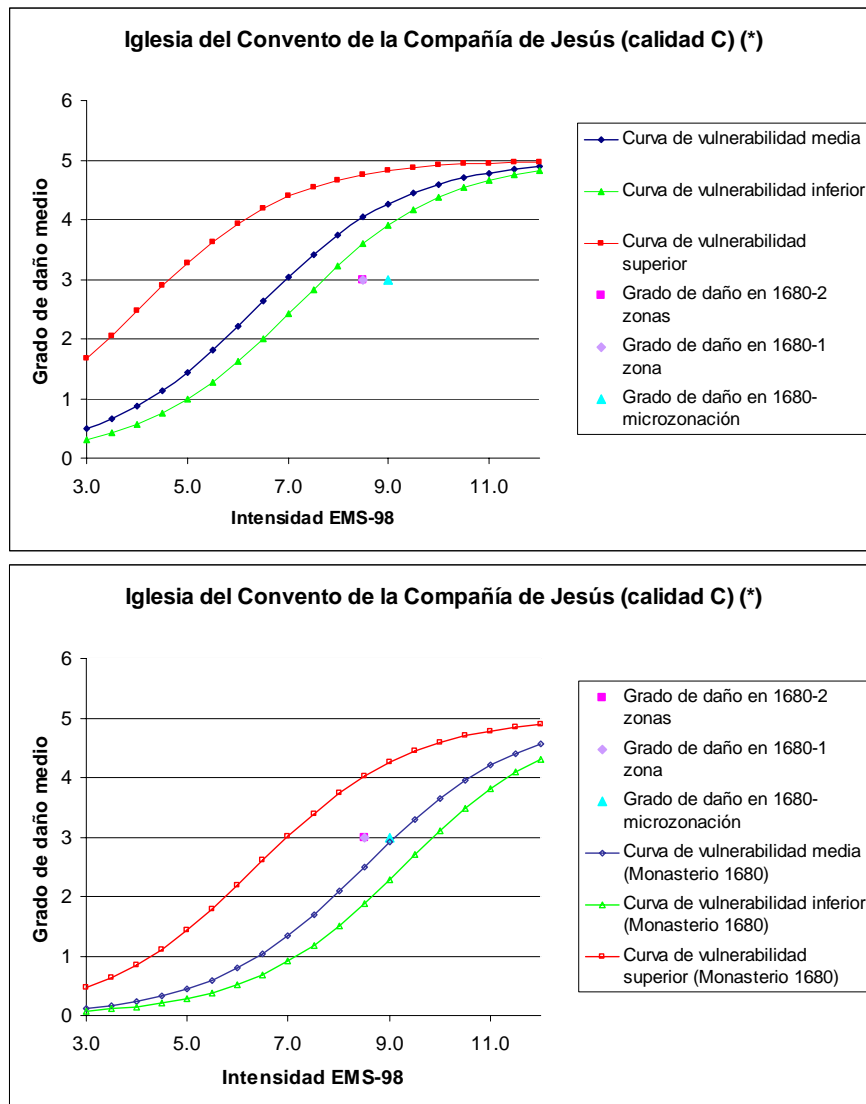


Figura 5.12. Curvas de vulnerabilidad de la iglesia del convento de la Compañía de Jesús, con su tipología actual de iglesia (superior), y con la tipología de monasterio de 1680 (inferior)

Por último, cabe preguntarse qué ocurre con las curvas de vulnerabilidad individuales si se utiliza la microzonación alternativa con el registro IM2. En la figura 5.13 se muestran tres ejemplos, para una iglesia, un monasterio y un palacio. Se observa que los resultados con la microzonación escogida para este estudio son claramente mejores que utilizando IM2. Este resultado se ve claramente sobre todo en el caso de las iglesias, donde 6 de ellas presentan mejores resultados con la microzonación de este estudio (utilizando IM1), de las cuales en 5 casos los daños observados coinciden exactamente con las curvas de vulnerabilidad promedio. Sólo para la iglesia del colegio de los Clérigos Menores los resultados son mejores para la microzonación propuesta pero los daños observados y esperados no son tan parecidos (figura 5.11b). También son mejores los resultados para los dos palacios, y no parece haber diferencias en los 3 monasterios entre ambas microzonaciones, ni tampoco en los castillos, que no

presentan buenos resultados en ambos casos. Sólo hay dos monumentos de los 19 estudiados en los que la microzonación IM2 presenta mejores resultados: la iglesia de San Pablo y la de la Compañía de Jesús. La primera ha cambiado de edificio desde 1680, y la segunda de tipología, por lo que no pueden servir de ejemplo del “buen comportamiento” de los resultados al utilizar IM2.

Por otro lado, en los 6 monumentos en zona B2 de Málaga (la zona de mayores amplificaciones y de mayor porcentaje de grados de daño 4 y 5), la microzonación utilizando IM2 da los mismos resultados que sin microzonación, y en todos ellos salvo la Compañía (que cambió de tipología), los resultados son peores que con la microzonación con IM1. Dado que se trata de una subzona tan importante por su cantidad de monumentos y sus mayores daños, este hecho se considera un dato importante. Por tanto se puede concluir que la microzonación utilizando IM2 como registro de entrada en *ProShake*, no reproduce satisfactoriamente los daños ocasionados en los monumentos de Málaga en el terremoto de 1680, quedando descartada frente a la microzonación con el registro IM1 tomado de la base de datos *strong-motion* europea. Por tanto, a partir de ahora sólo se tendrá en cuenta la microzonación con IM1.

### 5.3.5. Grados de daño de los monumentos de Málaga

Una vez obtenidas las curvas de vulnerabilidad específicas para cada monumento, se pueden hallar sus grados de daño promedio, suponiendo una intensidad similar a la del sismo de 1680. Los resultados para los 19 monumentos estudiados se presentan en la tabla 5.6.

En la figura 5.14 se muestra el nº de monumentos con cada grado de daño, calculados a partir de los índices de vulnerabilidad inferior, medio y superior. Puede verse cómo la mayoría de los monumentos (un total de 13), presentan grados de daño esperados entre 3 y 4, si se consideran los índices  $V_I$  medios. Sin embargo, al considerar los índices de vulnerabilidad superiores casi la totalidad de los edificios tienen grados de daño esperados de 4 y 5 (un total de 17), lo que implicaría daños muy graves o incluso la completa destrucción de los mismos. Puede decirse, por tanto, que los grados de daño esperados en estos monumentos serían muy elevados si se produjera un sismo como el ocurrido en 1680. Sin embargo, debe recordarse que el grado de daño promedio representa una distribución de daño, por lo que debe venir acompañada de una probabilidad de daño, que se obtendrán en el siguiente apartado.

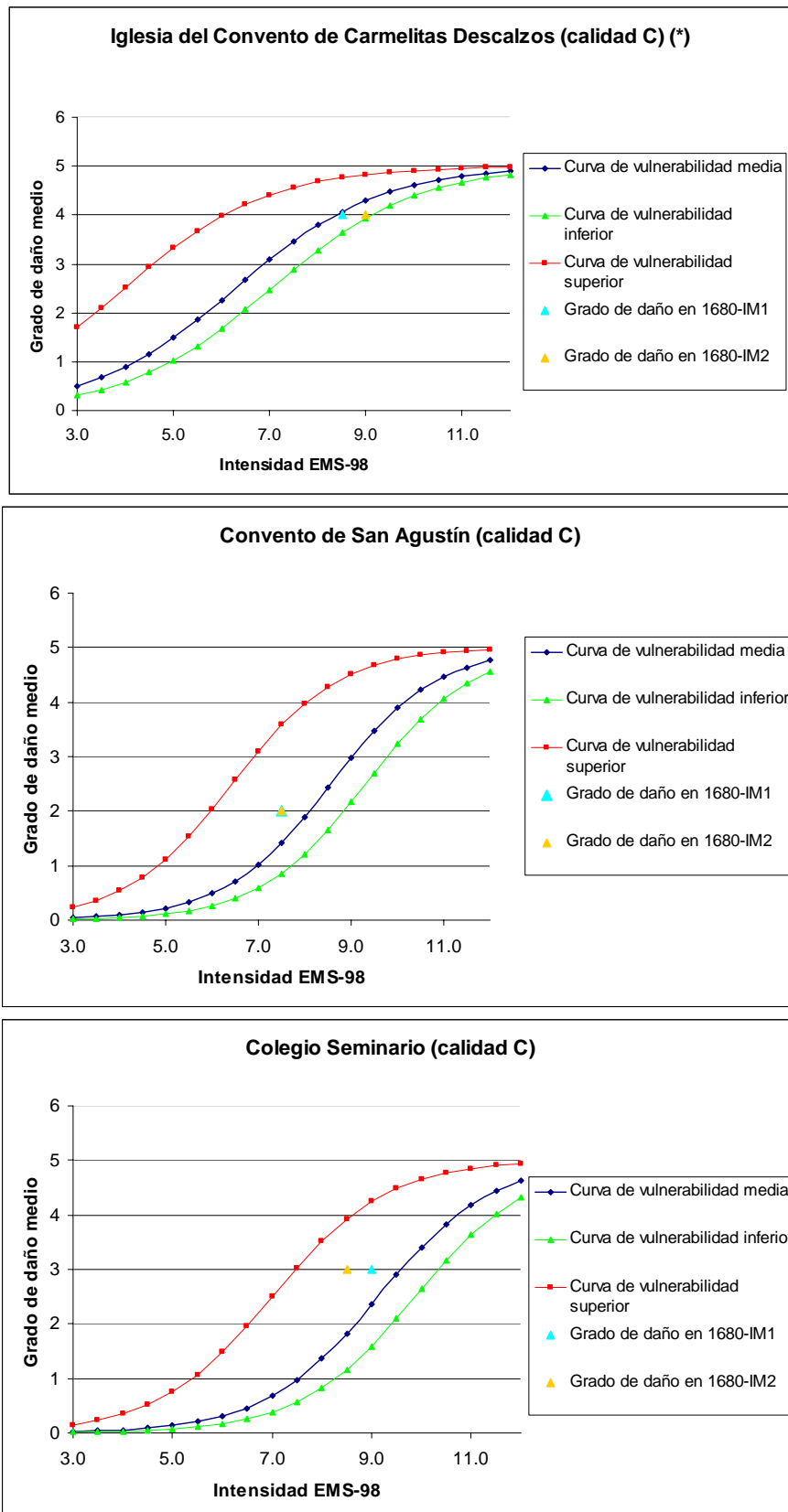


Figura 5.13. Ejemplos de comparación de las curvas de vulnerabilidad individuales utilizando los acelerogramas IM1 e IM2 para una iglesia (superior), un monasterio (intermedio), y un palacio (inferior)



Tabla 5.6. Grados de daño promedio para cada monumento

Monumento	Tipología	$\mu_d$ inferior	$\mu_d$ medio	$\mu_d$ superior
Iglesia del convento de los Carmelitas Descalzos	iglesia	3.63	4.07	4.77
Iglesia del convento de Santo Domingo	iglesia	3.46	3.94	4.73
Parroquia de San Juan	iglesia	3.63	4.07	4.77
Iglesia de San Pedro en los Percheles	iglesia	3.37	3.86	4.70
Iglesia del antiguo Colegio de los Clérigos Menores	iglesia	3.08	3.63	4.63
Iglesia del convento de los Capuchinos	iglesia	3.59	4.04	4.76
Parroquia de los Santos Mártires	iglesia	3.63	4.07	4.77
Iglesia de San Pablo	iglesia	2.68	3.28	4.49
Castillo de Gibralfaro	castillo	0.65	1.02	2.90
Alcazaba	castillo	0.65	1.02	2.90
Convento de los Ángeles Trinitarios Calzados	monasterio	1.21	1.90	3.98
Iglesia del antiguo convento de la Compañía de Jesús	iglesia	3.90	4.27	4.82
Iglesia del convento de Nuestra Señora de la Victoria	iglesia	2.68	3.28	4.49
Convento de las Recoletas Bernardas del Císter	monasterio	1.71	2.50	4.32
Parroquia de Sagrario	iglesia	1.96	2.57	4.16
Casa Episcopal	palacio	1.53	2.30	4.22
Colegio Seminario	palacio	1.59	2.36	4.25
Convento de San Agustín	monasterio	0.86	1.42	3.58
Catedral	iglesia	2.36	2.98	4.37

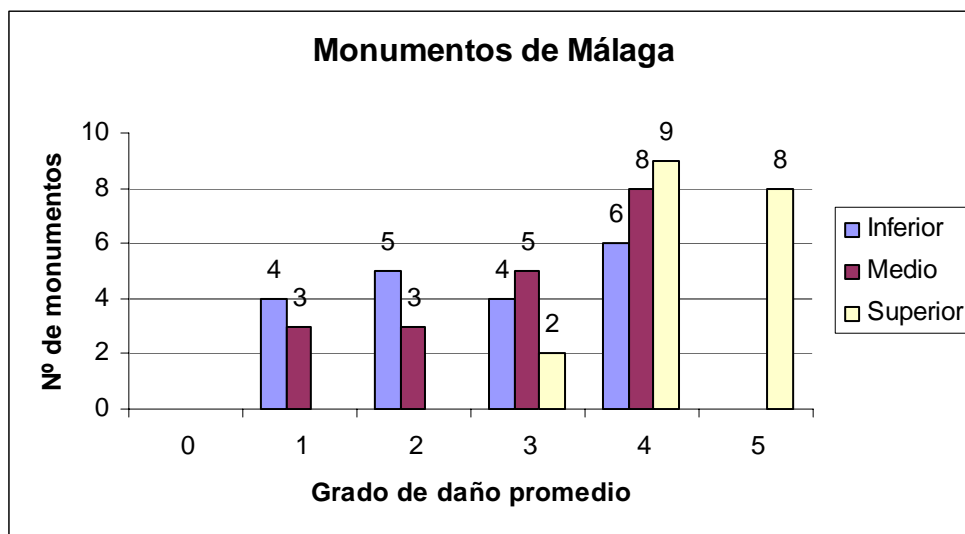


Figura 5.14. Distribución de los grados de daño promedio en los monumentos de Málaga dañados en 1680

La comparación de los grados de daño medios con los observados en el terremoto de 1680 se muestra en la figura 5.15. Se observa que, en general, los daños sufridos por los monumentos en el sismo de 1680 fueron ligeramente mayores que los obtenidos en este estudio a partir del índice de vulnerabilidad medio. El estudio de los índices de vulnerabilidad predice la existencia de 3 monumentos con grado de daño 1, mientras que en el sismo de 1680 se

observaron daños de grado mayor. Sin embargo, para cada grado de daño hay una diferencia de tan sólo uno o dos monumentos entre los determinados mediante la metodología de los índices de vulnerabilidad y los daños observados en 1680. La excepción se encuentra en los monumentos de grado 1, con 3 edificios con ese grado de daño esperado y ninguno con daños en 1680. Debe mencionarse que ninguno de los monumentos evaluados tuvo grados de daño 5, ni observados ni esperados. Asimismo, debe recordarse que sí hubo edificios con este grado de daño en 1680, pero fueron demolidos o trasladados.

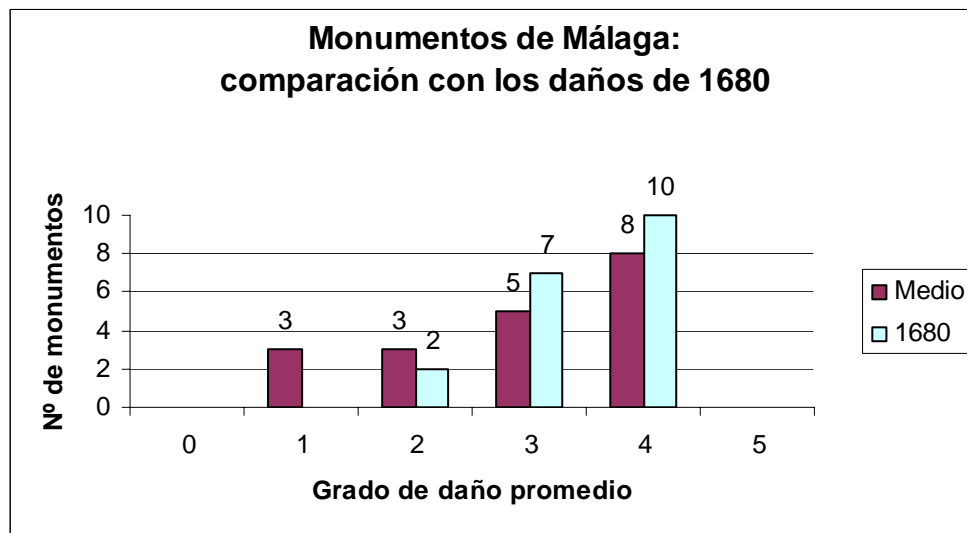


Figura 5.15. Grados de daño promedio y comparación con los daños en el terremoto de 1680

En la figura 5.16 se analizan por separado los grados de daño para cada uno de los monumentos, comparándose con los daños observados. Se observa la buena correlación entre los grados de daño medios y los observados en la tipología de las iglesias, a excepción de la catedral (de la que ya se ha hablado), la iglesia de San Pablo (que cambió de edificio), y la iglesia de la Compañía de Jesús (que cambió de tipología). En los monasterios y los palacios el ajuste no es tan bueno, pero se considera aceptable, y en los castillos hay una diferencia de tres grados entre los daños esperados y los observados, como ya se pudo ver en las curvas de vulnerabilidad del apartado anterior. Debe observarse que, mientras que los grados de daño asignados en 1680 a los monumentos (en la escala EMS-98), son valores enteros entre 0 y 5, los grados de daño promedio esperados, resultados de una función de vulnerabilidad, no lo son. Por otro lado, dadas las fuentes de error que se tienen (mencionadas en el apartado anterior), una diferencia de  $\pm 1$  grado se considera un resultado aceptable.

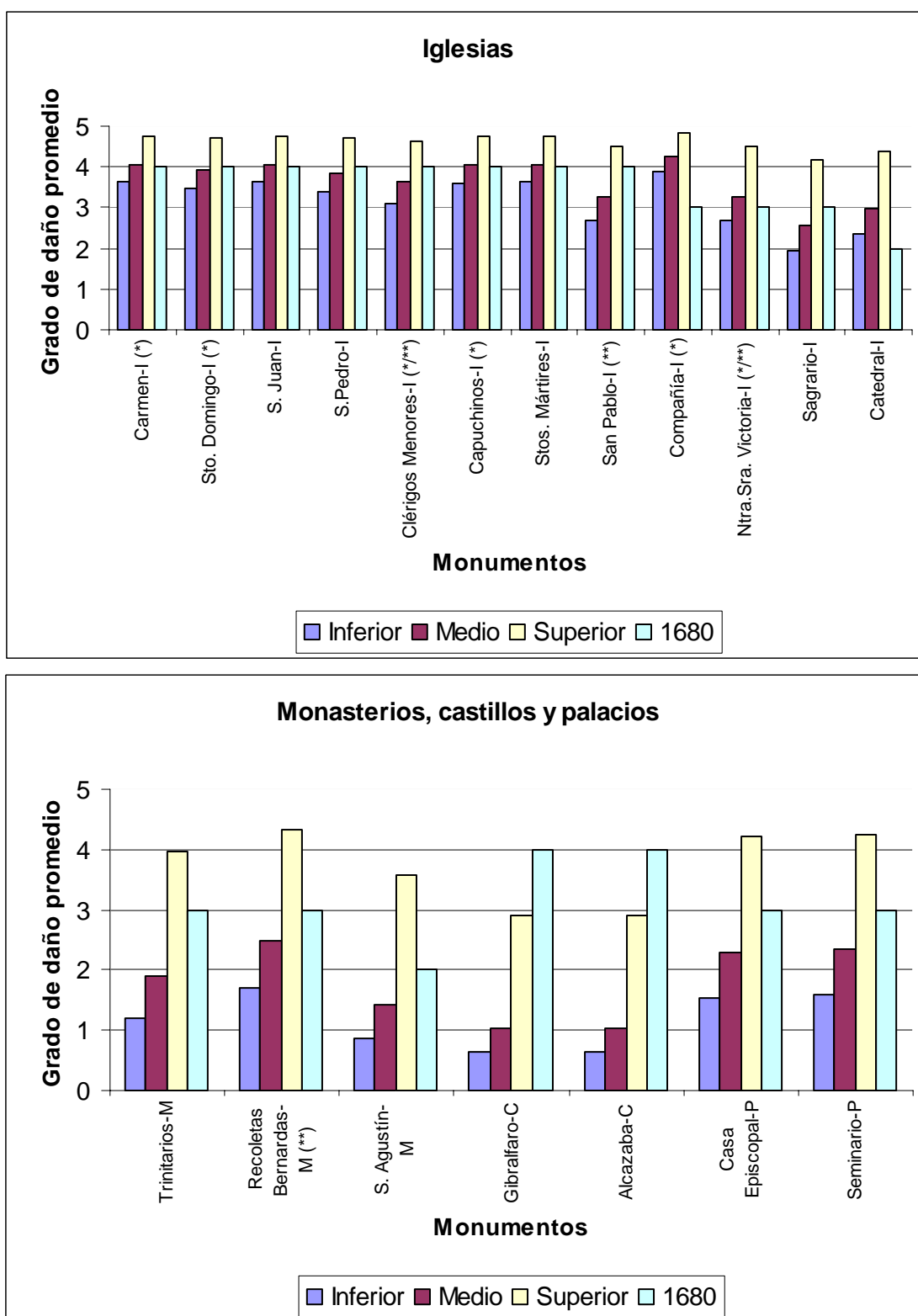


Figura 5.16. Grados de daño promedio esperados y daños observados en el terremoto de 1680 para cada uno de los monumentos, según su tipología. \*: clase B; \*\*: clase C

### 5.3.6. Probabilidades de daño de los monumentos de Málaga

Ya se ha indicado que el grado de daño promedio representa una distribución de daño. Por tanto, debe calcularse una probabilidad de daño para cada uno de los 19 monumentos estudiados. Estas probabilidades se han hallado a partir de la distribución binomial definida en el apartado 3.2.3 (ecuación 3.36). Las tablas con los valores de dichas probabilidades se encuentran en el anexo VIII. Por otro lado, en el anexo IX se muestran las probabilidades de daño para cada grado de daño en forma de histograma, para cada uno de los monumentos dañados en 1680.

En la figura 5.17 se muestra la distribución de los monumentos en función de su probabilidad de daño, obtenidas a partir de los índices de vulnerabilidad inferior, medio y superior. La gráfica de las probabilidades a partir del índice de probabilidad medio muestra que las mayores probabilidades corresponden a grado de daño 4, asociados a daños muy graves en las estructuras, mientras que las menores probabilidades son aquéllas para grados de daño 0 y 1 (ausencia de daños o daños ligeros). Por otro lado, la mayoría de los monumentos presentan una baja probabilidad de colapso o destrucción total (grado 5). Sin embargo, hay 5 monumentos que presentan una probabilidad del 30-40% de sufrir colapso, lo cual no es una cantidad desdeñable. La mayor parte de monumentos presentan una baja probabilidad de sufrir daños moderados ( $k=2$ ), ligeros o ausencia de daños, y probabilidades moderadas de sufrir daños graves ( $k=3$ ). Seis de los 19 monumentos tendrían una probabilidad del 40-50% de sufrir daños muy graves, de grado 4, en caso de producirse un terremoto de las mismas características que el sucedido en 1680. Asimismo, hay un 40-50% de probabilidades de que algún monumento sufra colapso total.

Considerando las probabilidades a partir del índice de vulnerabilidad superior, aumentan las probabilidades de sufrir grados de daño 4 y 5. Destaca la aparición de altas probabilidades de sufrir colapso, que no se veían en las figuras a partir de los índices de vulnerabilidad inferior y medio.

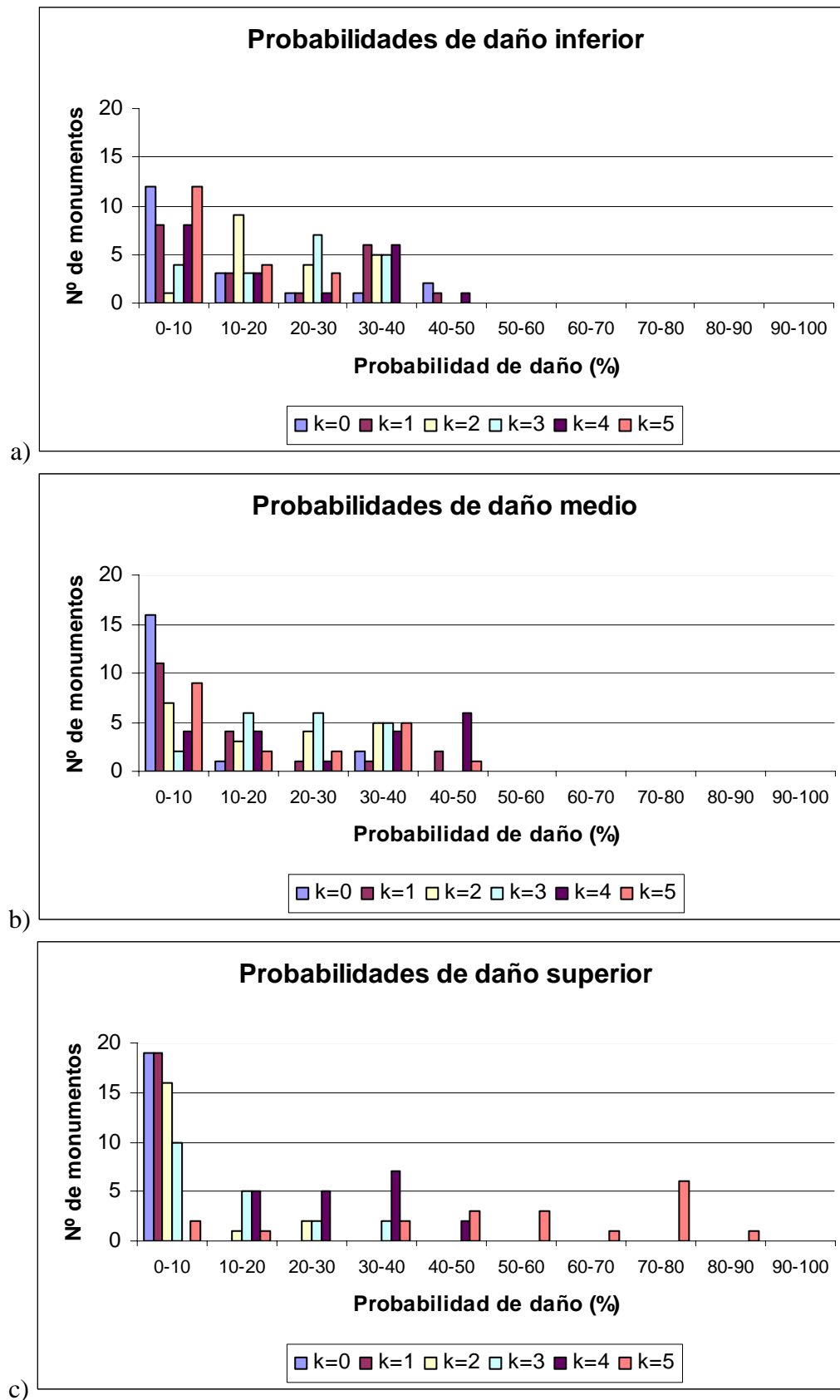


Figura 5.17. Probabilidades de daño de los monumentos de Málaga utilizando los índices de vulnerabilidad inferior (a), medio (b) y superior (c)

Por último, dado que disponemos de información de daños observados en los monumentos en un sismo real, se van a comparar los grados de daño esperados correspondientes a la mayor probabilidad de daño (o lo que es lo mismo, los daños más probables), con los daños observados en 1680, para cada uno de los monumentos (figura 5.18), utilizando las probabilidades a partir del índice de vulnerabilidad medio. Puede verse cómo, en la mayor parte de los edificios (en 16 de los 19), los grados de daño más probables coinciden con los daños observados en 1680, o hay una diferencia de un grado entre unos y otros, lo que se considera un buen resultado dadas las incertidumbres de ambos datos. Los únicos monumentos con más de un grado de diferencia entre los daños esperados y observados corresponden a la iglesia de la Compañía de Jesús (en el que el grado de daño más probable es dos grados mayor que el observado), y los castillos de Gibralfaro y la Alcazaba, con daños observados tres grados mayores que los más probables. Ya se ha comentado que, al considerar iglesia al antiguo convento de la Compañía de Jesús, al ser la tipología I más vulnerable que la de monasterio, los daños esperados serán mayores de los observados. En cuanto a los castillos, ya se ha hablado de la problemática que existe en estos edificios malagueños.

El buen ajuste entre los grados de daño más probables de cada monumentos y sus daños observados en 1680 constituyen el segundo paso para comprobar la validez del método: la metodología de los índices de vulnerabilidad de Lagomarsino *et al.* (2003) parece ajustarse bien a los datos de los monumentos malagueños, tanto en sus curvas de vulnerabilidad como en el análisis de los grados de daño esperados. Por tanto, se puede decir que es posible aplicar este método a la zona de estudio, pues los resultados que se obtienen están demostrando ser suficientemente realistas.

Realizando esta misma comparación en función de la tipología y la subzona de la microzonación a la que pertenecen, y teniendo en cuenta sólo los monumentos evaluados con calidades  $\alpha$  y  $\beta$ , en la mayoría de las iglesias se corresponden los grados de daño más probables con los observados. La excepción está en la catedral, en zona A (roca), donde la diferencia es de un grado. En los monasterios (sólo en zona B4), los daños observados son un grado mayores de los esperados. Por último, se conserva la diferencia de 3 grados en los castillos de la ciudad, pues la información de los daños encontrada es suficientemente detallada como para asignarles calidad  $\beta$ , pero los daños observados en 1680 fueron mucho mayores de lo que se obtiene utilizando la metodología de los índices de vulnerabilidad.

El buen ajuste entre los daños más probables y los observados permite avalar la validez del método de los índices de vulnerabilidad en su aplicación a la ciudad de Málaga, tras haber comprobado previamente dicha coherencia en las curvas de vulnerabilidad individuales de los monumentos.

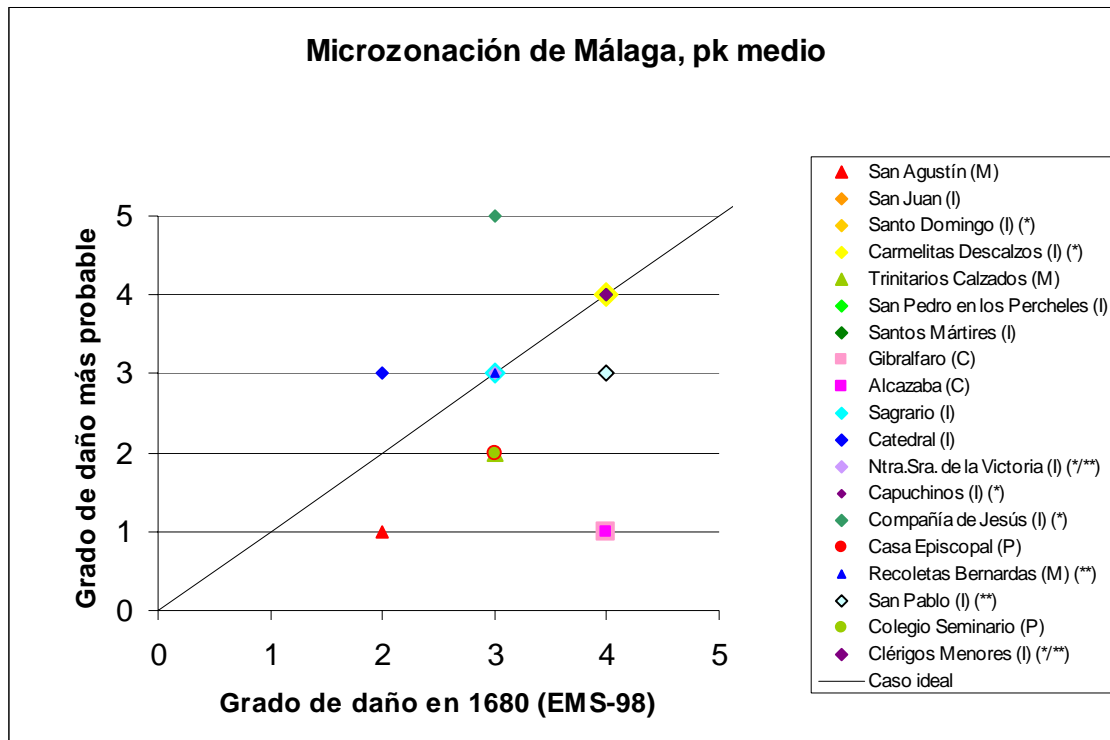


Figura 5.18. Grado de daño más probable (índice de vulnerabilidad medio), frente al grado de daño observado en el sismo de 1680

#### 5.4. Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que, si se produjera un sismo como el de 1680, una cantidad importante de los edificios sufriría grados de daño 4 (muy graves), en las estructuras. Un tercio de los monumentos tiene un 40-50% de probabilidades de sufrir este grado de daño, y algún monumento tendría esta probabilidad de destruirse por completo. Estos resultados indican la importancia de tomar las medidas necesarias para reforzar estos monumentos que forman parte del patrimonio histórico y cultural malagueño, y así evitar posibles pérdidas irreparables en caso de producirse un terremoto como el sucedido en el siglo XVII.

Se observa un buen ajuste entre los resultados obtenidos en este estudio y los daños observados en 1680, a menudo coincidentes, tanto en el análisis de las curvas de vulnerabilidad

como de los grados de daño. Las excepciones se dan en aquellos edificios cuya tipología ha cambiado desde el siglo XVII o que han sido reconstruidos desde entonces. Asimismo, la catedral de Málaga no reproduce los daños observados, posiblemente por estar considerándola como una iglesia corriente. Se cree que debería añadirse la tipología de “catedral” a las ya clasificadas por Lagomarsino *et al.* (2003), para diferenciarlas de las iglesias, menos robustas. En los dos castillos de Málaga se produce un gran desajuste entre los daños esperados y observados, con una diferencia de tres grados. Se cree que esto es debido a que estos edificios no parecen corresponderse con los castillos italianos con los que se han obtenido los parámetros aplicados en esta metodología, al ser más antiguos (y por tanto más vulnerables), que los italianos.

Por último, comentar que no parece haber desajustes entre los resultados esperados y los daños observados debido a la forma de delimitar las zonas en la microzonación dada en el capítulo 5. Los casos excepcionales en que ha habido diferencias entre los daños esperados y observados parecen ser debidos a la tipología, y todos ellos se encontraban en medio de una subzona, y no en los límites de la misma. Por tanto, la incertidumbre a la hora de delimitar las zonas no ha supuesto ningún desajuste en los resultados de vulnerabilidad.







## *Capítulo 6*

# *Escenarios sísmicos en la ciudad de Málaga*





### 6.1. Introducción

En el capítulo anterior se ha comprobado la validez de la aplicación del método de los índices de vulnerabilidad a los monumentos de la ciudad de Málaga, y se ha comparado los resultados obtenidos con los daños observados en aquellos edificios que fueron dañados en el terremoto de 1680 y siguen existiendo en la actualidad.

En este capítulo se van a proponer dos escenarios sísmicos distintos: uno determinista basado en el terremoto de Málaga de 1680, y otro probabilista basado en la Norma Sismorresistente Española (NCSE-02). Se pretende responder a la pregunta de qué tipo de daños presentarían los monumentos malagueños en caso de producirse un terremoto de las mismas características del sismo de 1680, o el propuesto en la norma NCSE-02. Para ello, además de los monumentos del capítulo anterior, se analizarán otros monumentos del centro de la ciudad, de construcción posterior a 1680, que forman parte de su patrimonio, y cuyos posibles daños debidos a un terremoto podrían constituir una pérdida irreparable para la ciudad.

Como se verá, se está estudiando de nuevo en este capítulo el terremoto de 1680. Sin embargo, el planteamiento respecto del capítulo anterior es muy distinto. En el capítulo 5 se partía de la intensidad que afectó a la ciudad de Málaga en el sismo de 1680, y se obtenían las intensidades de cada subzona restando las amplificaciones en términos de intensidad de cada una de ellas. Al estudiar el escenario determinista, se partirá de la intensidad máxima del terremoto y se obtendrá la intensidad que afecta a la ciudad aplicando una ley de atenuación, añadiendo finalmente las amplificaciones en términos de intensidad de cada subzona.

El estudio que se va a llevar a cabo en este capítulo completa el estudio de los escenarios sísmicos en edificios ordinarios de Málaga realizado dentro del proyecto ERSE (Irizarry *et al.*, 2006; Irizarry *et al.*, 2007). En aquel estudio se utilizaron los métodos de las matrices de probabilidad de daño y los índices de vulnerabilidad para evaluar los daños esperados en los edificios ordinarios de la ciudad para los mismos escenarios sísmicos: el de 1680 y el dado por la norma NCSE-02. Los resultados obtenidos incluían la estimación de altas pérdidas en cuanto a edificios inhabitables,

víctimas mortales, heridos y personas sin hogar. Por otro lado, el escenario determinista basado en el sismo de 1680 preveía daños mucho más graves que el propuesto por la norma NCSE-02, describiéndose como de un *gran potencial destructor* para la ciudad de Málaga. Estas conclusiones nos hacen plantearnos la pregunta de qué les sucedería a los monumentos de la ciudad que forman parte de su patrimonio histórico y cultural si se produjera un sismo como el analizado en ambos escenarios. Dado que en el terremoto de 1680 hubo un alto porcentaje de monumentos completamente destruidos o con daños muy graves, es importante conocer qué podría ocurrirles a estos edificios si un sismo parecido vuelve a suceder en la región. El conocimiento de los daños esperados en estos monumentos es importante de cara a la toma de las medidas necesarias (técnicas de refuerzo y conservación, etc.), para evitar la posible pérdida del patrimonio malagueño debida a movimientos sísmicos.

## **6.2. Clasificación de monumentos de la zona centro de Málaga**

Para realizar el estudio de los escenarios sísmicos se han tomado los mismos monumentos que fueron analizados en el capítulo anterior, y se han añadido otros más modernos, siguiendo los siguientes criterios:

- Se han incluido edificios pertenecientes a la zona de estudio: la zona centro de la ciudad de Málaga en la que se han obtenido las amplificaciones del suelo en la nueva microzonación obtenida en este estudio. Se han descartado aquellos edificios fuera de las zonas caracterizadas mediante la nueva microzonación, como son algunos edificios en zona D (que no se ha analizado en este estudio), y algunos edificios en la zona B, en la zona del puerto, en la que no se disponía de medidas de ruido sísmico o sondeos para hallar las amplificaciones del suelo.
- Entre los edificios que cumplían con los requisitos anteriores, se han elegido los monumentos de construcción anterior a 1850.
- A estos edificios se han añadido otros que, aún siendo posteriores a 1850, constituyen edificios malagueños emblemáticos, tales como el

Ayuntamiento, el teatro Cervantes, el Banco de España, el Banco Central y el Rectorado de la Universidad de Málaga.

Utilizando estos criterios, se han seleccionado un total de 35 monumentos adicionales del centro de Málaga para estudiar sus daños esperados en ambos escenarios sísmicos. Entre ellos hay dos monumentos Histórico-Artísticos de interés nacional, y un monumento Histórico-Artístico de interés provincial. Sumados a los 19 monumentos estudiados en el capítulo anterior, se tienen 54 edificios cuyo estudio de vulnerabilidad se pretende realizar. Las características básicas de cada uno de estos monumentos se muestran en la tabla 6.1, y su localización se muestra en la figura 6.1, donde se indica la tipología del edificio y la subzona de la microzonación de Málaga a la que pertenecen. Se indica con diferentes colores los monumentos que fueron dañados en el sismo de 1680 y los que han sido añadidos en el estudio de los escenarios sísmicos.

Tabla 6.1. Monumentos del centro de Málaga que van a ser analizados

Ref.	Monumento	Época	Tipología	Observaciones
7	Iglesia de Nuestra Señora del Carmen	Finales del siglo XVII	I	Antes iglesia del convento de los Carmelitas Descalzos
9	Iglesia del convento de Santo Domingo	1489	I	
10	Parroquia de San Juan Bautista	1554	I	Antes parroquia de San Juan
11	Iglesia de San Pedro en los Percheles	1629	I	
12	Iglesia de la Concepción	1701-1715	I	Antes iglesia del antiguo Colegio de los Clérigos Menores
14	Iglesia de la Divina Pastora y Santa Teresa de Jesús	1632	I	Iglesia del convento de los Capuchinos
17	Parroquia de los Santos Mártires	Primera mitad del siglo XVI	I	
18	Iglesia de San Pablo	1874-1891	I	
21	Castillo de Gibralfaro	Siglo XI	C	
22	Alcazaba	Siglos XI-XIV	C	
24	Convento de San Onofre de Trinitarios Calzados	Siglo XVI	M	Antes convento de los Ángeles Trinitarios Calzados
25	Iglesia del Santo Cristo de la Salud (San Telmo)	1590-1630	I	Antes iglesia del antiguo convento de la Compañía de Jesús
26	Iglesia del convento de Nuestra Señora de la Victoria	1693-1701	I	
27	Abadía de Santa Ana	1873	M	Antes convento de las Recoletas Bernardas del Císter
28	Parroquia de Sagrario	1488-1710	I	
29	Casa Episcopal	Siglos XVI-XVIII	P	
30	Colegio Seminario	1590-1671	P	Ahora colegio de Primaria
34	Convento de San Agustín	Siglo XVII	M	
36	Santa iglesia de la Catedral / Basílica de la Encarnación	1527-1782	I	
37	Parroquia de Santiago	1493-1545	I	
38	Antiguo hospicio de San Julián	1663-1669	M	Ahora Museo de Cofradías. Contiene una iglesia
39	Teatro Cervantes	1870	TE	
40	Casa de los Condes de las Navas	Siglo XVIII	P	
41	Instituto de Turismo Andaluz	1847-1865	P	Antiguo Parador de San Rafael (del León)
42	Fundación Martí Torres	Siglo XVIII	P	

Tabla 6.1. (cont.)

Ref.	Monumento	Época	Tipología	Observaciones
43	Casa del Consulado	1782	P	Monumento Histórico-Artístico de interés nacional
44	Hogar de Jesús Abandonado	Principios del siglo XIX	P	
45	Facultad de Filosofía y Letras	Siglo XIX	P	
46	Museo Picasso	Siglo XVI	P	Antiguo Palacio de Buenavista. Uno de los edificios domésticos más antiguos de la ciudad
47	Museo de Artes Populares	Siglos XVII-XVIII	P	También Mesón de la Victoria.
48	Antigua casa y taller del escultor Pedro de Mena	Siglo XVII	P	Monumento Histórico-Artístico de interés provincial
49	Palacio de los Condes de Villalcázar	1786	P	Monumento Histórico-Artístico de interés nacional
50	Gobierno Civil. Antigua Aduana	1791-1829	P	
51	Banco de España	1936	P	
52	Ayuntamiento	1912-1919	P	
53	Mercado Central de Atarazanas	1879	P	
54	Capilla del Agua	Siglo XVIII	E	O capilla de Jesús del Rescate
55	Iglesia y convento de las Dominicas (vulgo Catalinas)	1785-1787	M	
56	Archivo Municipal	1792-primer mitad del siglo XIX	P	
57	Antiguo Palacio Ugarte-Barrientos	1877-1880	P	
58	Sede de Gobernación de la Junta de Andalucía	Siglos XVIII-XIX	P	
59	Banco Central	Primer cuarto del siglo XX	P	
60	Palacio de Salinas	Siglos XVI-XVIII	P	Uno de los edificios domésticos más antiguos de la ciudad
61	Cáritas Diocesana	1783	P	
62	Antiguo Montepío de Viñeros	1782-1786	P	Ahora salas culturales de la Fundación Unicaja
63	Antiguo palacio de Valdeflores	Finales del siglo XVII	P	Ahora Servicio Provincial de la Mujer.
64	Antiguo Conservatorio María Cristina	Siglo XVIII	P	Ahora Fundación Unicaja. Construido sobre el solar del convento de San Francisco.
65	Alcubilla Mayor del acueducto de San Telmo	1784	TO	
66	Antigua Gota de Leche	1783-1785	P	Ahora Centro Cultural Provincial
67	Palacio Zea Salvatierra	1717-1720	P	
68	Antiguo Palacio del Marqués de la Sonora	Siglo XVIII	P	
69	Teatro romano	Siglo I a.C.	TE	
70	Iglesia de San Lázaro	Finales del siglo XV	I	
71	Rectorado de la Universidad de Málaga	1920-1923	P	Antiguo edificio de Correos y Telecomunicaciones

Se observa cómo la gran mayoría de los monumentos se encuentran de nuevo en la zona B2, que, como se recordará, es la zona de mayores amplificaciones del suelo ( $\Delta I=+1.5$ ). También puede verse cómo hay una cantidad importante de edificios en la zona A de roca entre la Alcazaba y el mar o en las cercanías de la catedral (nº36), en zona de roca.

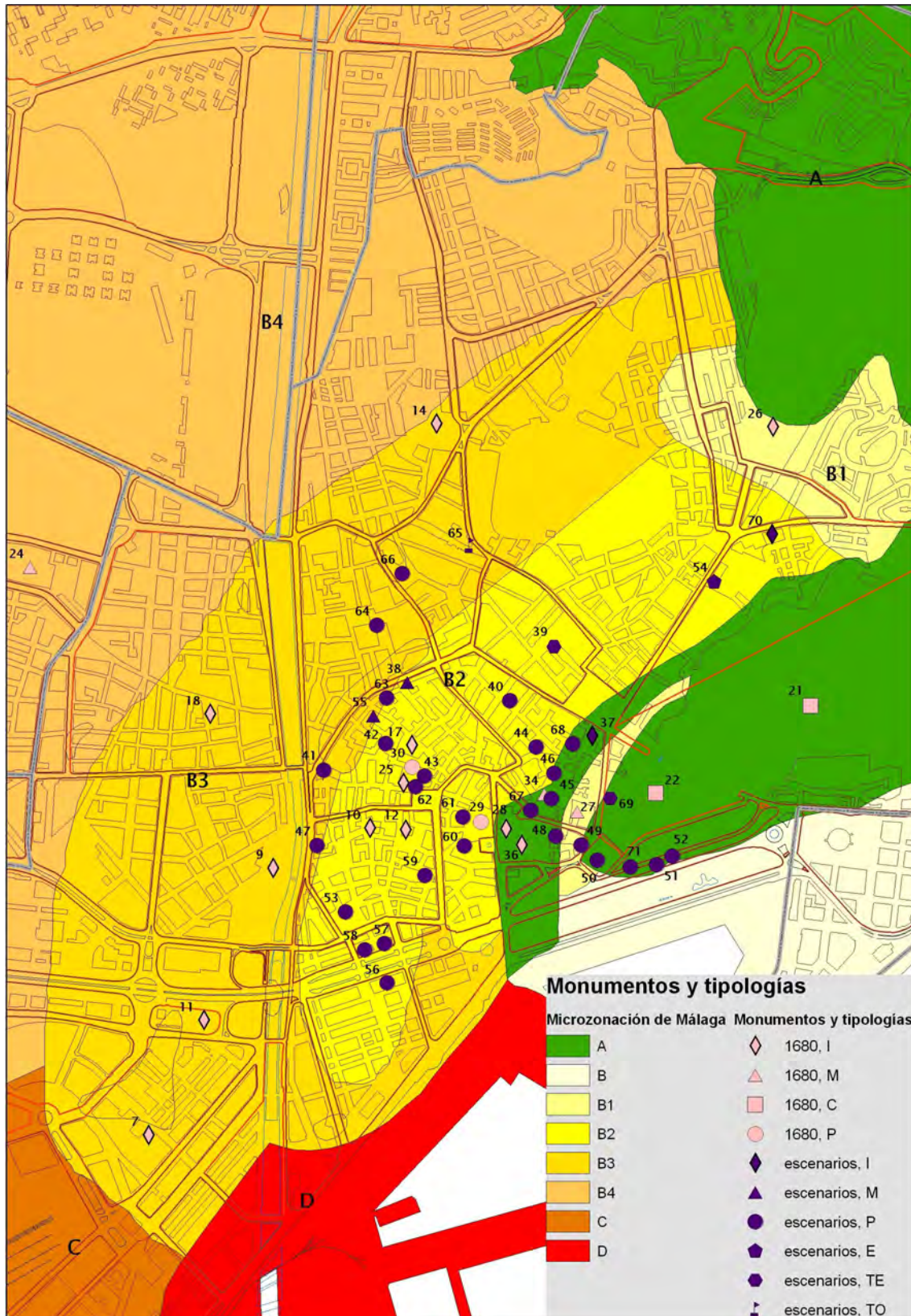


Figura 6.1. Microzonación del centro de Málaga y monumentos de estudio, clasificados según su tipología estructural. En rosa se marcan los edificios que existían en 1680 y en morado los nuevos



La distribución de estos edificios en función del siglo de construcción y la tipología puede verse en las figuras 6.2 y 6.3, respectivamente. Se observa cómo la gran mayoría de los edificios fueron construidos entre los siglos XVI y XIX, un total de 43 de los 54 estudiados. Los cuatro monumentos del siglo XX pertenecen al grupo de edificios emblemáticos que se han añadido a los edificios elegidos. Los dos edificios del siglo XI corresponden a los dos castillos de Málaga (Gibralfaro y la Alcazaba), de época árabe. Destaca el edificio del siglo I a.C. que no aparecía antes: se trata del teatro romano. Es importante hacer notar que hay 2 edificios más del siglo XV y dos más del XVI que no aparecían en el estudio de vulnerabilidad. Se trata de monumentos que, aún existiendo en 1680, no aparecen mencionados en los documentos históricos de los daños de este sismo. Uno de ellos es la parroquia de Santiago, del siglo XV, cabeza de una de las cuatro parroquias o barrios en que se encontraba dividida la ciudad a finales del XVII y cuyos daños (o ausencia de daños) durante el terremoto son, por el momento, una incógnita, mientras que las otras tres parroquias de la ciudad (San Juan, Santos Mártires y Sagrario), presentan abundante información acerca de sus daños observados.

En relación a las tipologías de los monumentos, se observa cómo en este caso la gran mayoría de los mismos son palacios. Hay solamente 2 monasterios y 2 iglesias más en este capítulo que en el estudio de los monumentos de 1680, y se mantienen los 2 castillos de la ciudad. Además, han aparecido tres tipologías nuevas: dos teatros (TE), una ermita (E), y una torre (TO).

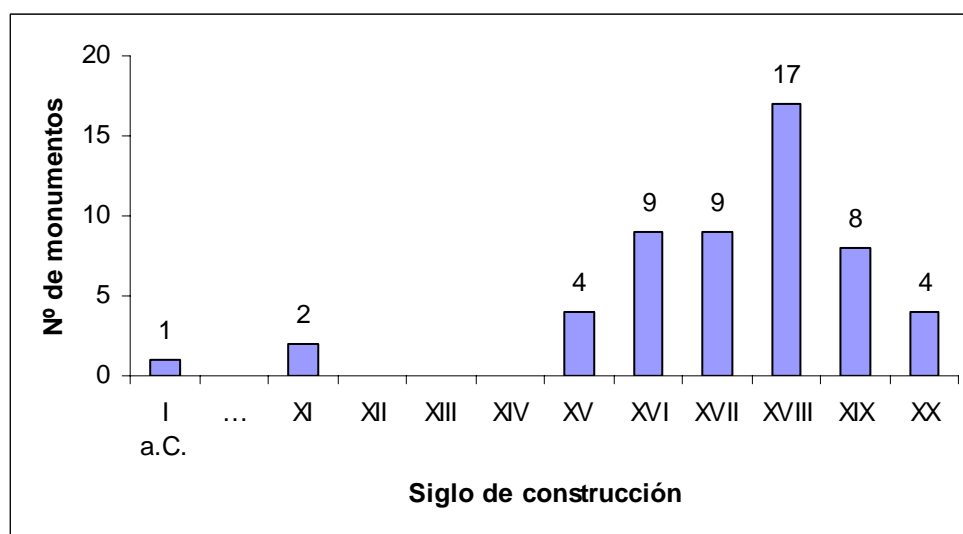


Figura 6.2. Clasificación de los monumentos según su siglo de construcción (escenarios)

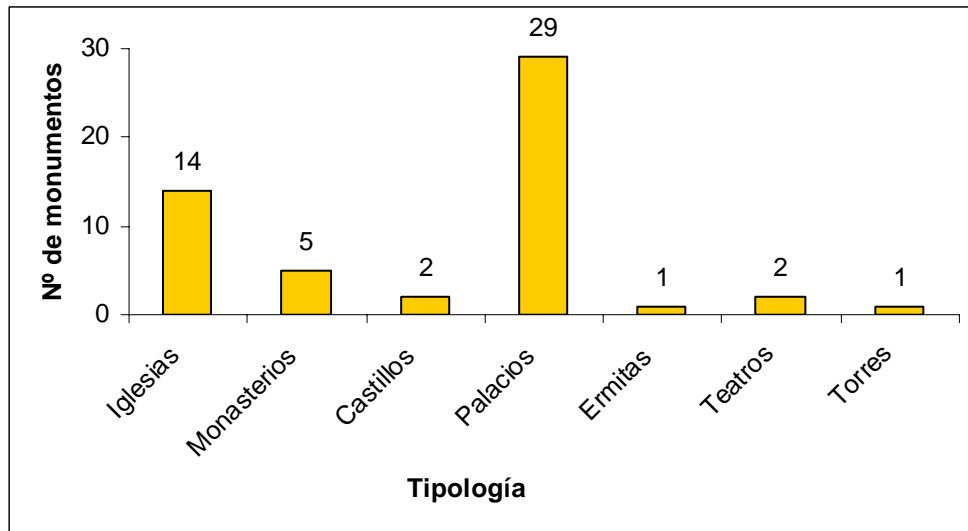


Figura 6.3. Tipologías de los monumentos de Málaga (escenarios)

### 6.3. Índices de vulnerabilidad de los monumentos de Málaga

Siguiendo la metodología descrita en el capítulo anterior, se han calculado los modificadores del índice de vulnerabilidad de los 35 monumentos nuevos, así como los de aquéllos del capítulo anterior cuya tipología ha cambiado respecto de la de 1680 (anexo X), obteniendo así los valores finales de sus índices de vulnerabilidad inferior, medio y superior. Estos parámetros son válidos con independencia del escenario sísmico utilizado.

En la figura 6.4a se observa la clasificación de los monumentos según sus índices de vulnerabilidad. Puede verse cómo la gran mayoría de los edificios tiene un índice de vulnerabilidad medio entre 0.6 y 0.8. Si se consideran los índices de vulnerabilidad superiores, la mayor parte de los monumentos presentan índices de vulnerabilidad entre 0.8 y 1.4. En la figura 6.4b se representan los monumentos con su índice de vulnerabilidad medio sobre el plano de la ciudad. Se observa cómo los mayores índices corresponden a los edificios que existían en 1680, excepto para alguno de los edificios añadidos en los escenarios y situados al norte de la ciudad.

En la tabla 6.2 se muestran los 12 monumentos con mayores índices de vulnerabilidad medios. Se observa que todos ellos corresponden a iglesias. Esto es lógico, pues las iglesias son la tipología de mayores índices de vulnerabilidad de todas

las que se utilizan en esta metodología. Entre estos monumentos más vulnerables se encuentran algunos de los edificios más emblemáticos de la ciudad, muchos de ellos de los siglos XV y XVI, que forman parte de su legado histórico y cultural, tales como la iglesia del convento de Santo Domingo, la iglesia de la Divina Pastora, la parroquia de San Juan o la catedral de Málaga. El hecho de que aparezcan en la lista de los monumentos más vulnerables del centro de Málaga indica que el peligro de perderlos como consecuencia de un terremoto es real, por lo que deben tomarse las medidas necesarias para reforzar estos edificios y evitar su pérdida ante un posible sismo en el futuro. Las dos iglesias menos vulnerables de la ciudad son la parroquia de Sagrario y la iglesia de Nuestra Señora de la Victoria, que son las únicas iglesias que no aparecen en la tabla 6.2.

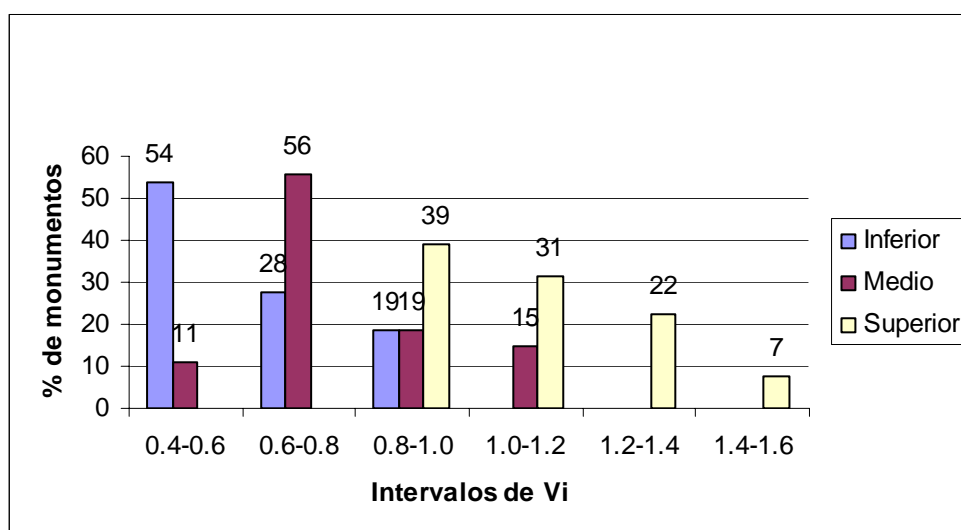


Figura 6.4a. Clasificación de los monumentos según su índice de vulnerabilidad (escenarios)

Tabla 6.2. Monumentos con mayores índices de vulnerabilidad medios

Monumento	Tipología	$V_i$ inferior	$V_i$ medio	$V_i$ superior
Iglesia del convento de Santo Domingo	iglesia	0.98	1.10	1.47
Iglesia de Nuestra Señora del Carmen	iglesia	0.97	1.09	1.46
Iglesia de la Divina Pastora y Santa Teresa de Jesús	iglesia	0.96	1.08	1.45
Iglesia del Santo Cristo de la Salud (San Telmo)	iglesia	0.92	1.04	1.41
Parroquia de San Juan Bautista	iglesia	0.91	1.03	1.40
Iglesia de San Pedro en los Percheles	iglesia	0.91	1.03	1.40
Iglesia de San Lázaro	iglesia	0.91	1.03	1.40
Parroquia de los Santos Mártires	iglesia	0.87	0.99	1.36
Santa iglesia de la Catedral / Basílica de la Encarnación	iglesia	0.87	0.99	1.36
Parroquia de Santiago	iglesia	0.87	0.99	1.36
Iglesia de la Concepción	iglesia	0.85	0.97	1.34
Iglesia de San Pablo	iglesia	0.85	0.97	1.34

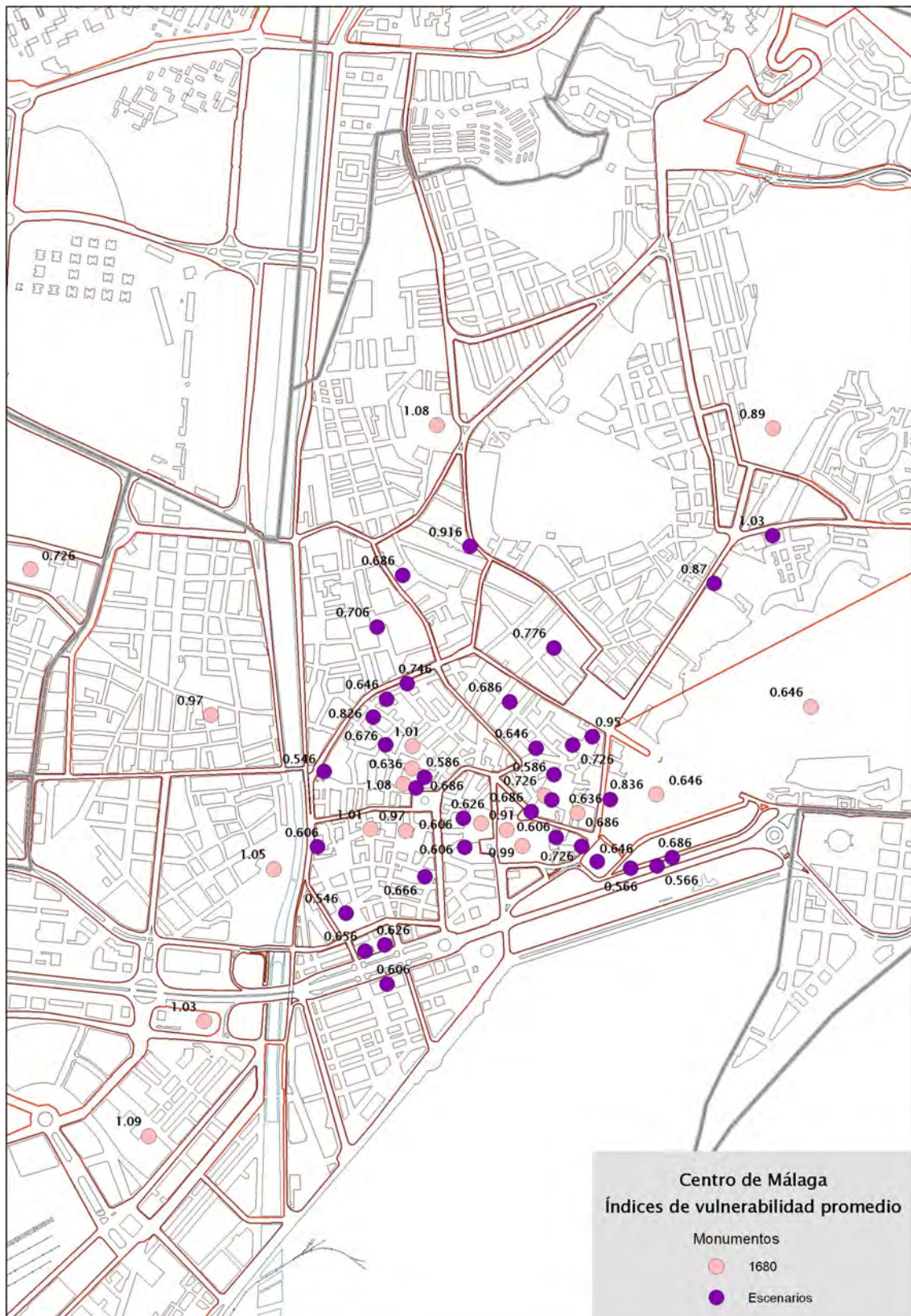


Figura 6.4b. Distribución de los índices de vulnerabilidad de los monumentos sobre el plano de la ciudad de Málaga (escenarios)



#### 6.4. Escenario determinista: terremoto de 1680

El primer escenario propuesto corresponde al del sismo de 1680 ( $I_{\text{máx}}=\text{VIII-IX}$ , EMS-98), supuesto el epicentro propuesto por Muñoz y Udías (1988, ver figura 2.4). A partir de una curva de atenuación tipo Sponheuer (1960), se ha trazado un mapa de intensidades esperadas en la ciudad de Málaga para este escenario sísmico (Irizarry *et al.*, 2007), que se muestra en la figura 6.5, donde puede verse que la intensidad esperada en el centro de Málaga (marcado como “zona de estudio”), es de VIII.

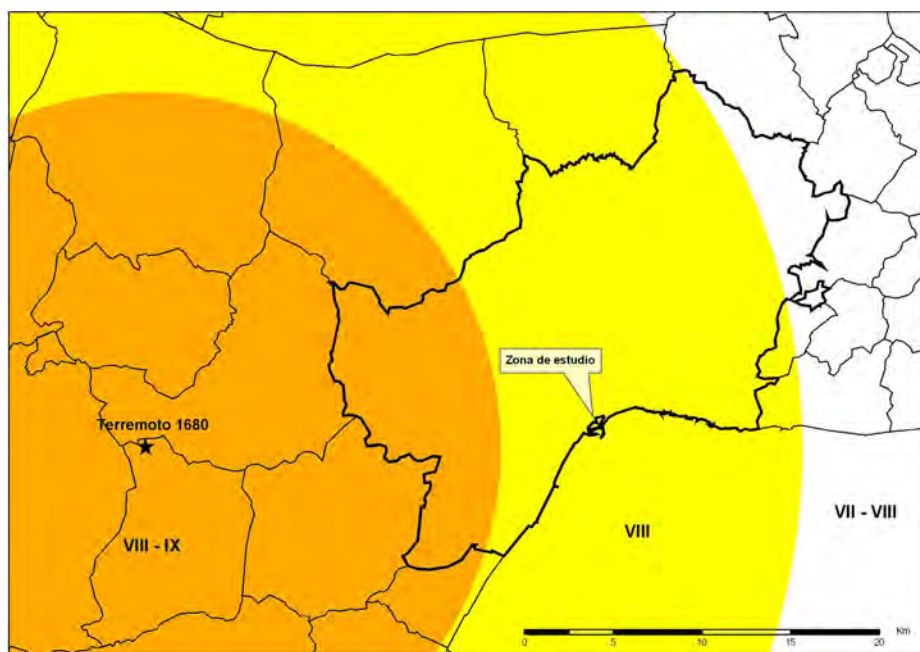


Figura 6.5. Intensidades esperadas en la ciudad de Málaga para un terremoto como el de 1680 (modificado a partir de Irizarry *et al.*, 2007)

Una vez conocida la intensidad esperada en el centro de Málaga para este escenario sísmico, que es de VIII en la escala EMS-98, se han aplicado las amplificaciones de intensidad para cada tipo de suelo obtenidas (capítulo 4), y se han hallado las intensidades que afectarían a cada monumento en este escenario sísmico. Los valores de intensidad para cada zona en este escenario se muestran en la tabla 6.3. Las intensidades que afectan a cada uno de los monumentos se muestran en la tabla 6.4 y la figura 6.6. En este escenario determinista, el casco antiguo de Málaga se vería afectado por una intensidad de IX-X, rodeado por una zona de intensidad IX, alrededor del río Guadalmedina. Estas altas intensidades implican que el escenario basado en el terremoto de 1680 va a traer como consecuencia daños graves en las estructuras,

especialmente en los monumentos más vulnerables, muchos de los cuales se encuentran en la zona de mayores intensidades esperadas.

Tabla 6.3. Intensidades para cada tipo de suelo (escenario 1680)

Subzona	Amplificación	$I_{esc1680}$
A	+0.0	8.0
B1	+1.0	9.0
B2	+1.5	9.5
B3	+1.0	9.0
B4	+0.5	8.5
C	+0.5	8.5

#### 6.4.1. Grados de daño de los monumentos de Málaga

Conocidos los índices de vulnerabilidad de cada monumento y las intensidades que les afectarían en este escenario sísmico, se pueden hallar los grados de daño promedio. Los valores de los grados de daño inferior, medio y superior para los 54 monumentos de este escenario se muestran en el anexo XI. La figura 6.7 muestra la distribución de los monumentos de Málaga en función de su grado de daño promedio. Se observa cómo la mayor parte de los monumentos presentan grados de daño medio esperados de 3 y 4, que corresponden a daños graves o muy graves. Considerando los índices de vulnerabilidad superiores, los grados de daño esperados de la práctica totalidad de edificios son de 4 y 5. Esto muestra la grave situación en que se encontrarían estos monumentos en un escenario como el del terremoto de 1680, pues se esperaría un 68% de monumentos con daños graves o muy graves considerando los índices de vulnerabilidad medios, y un 88% de monumentos con daños muy graves o completamente destruidos si se utilizan los índices de vulnerabilidad superiores.

Tabla 6.4. Monumentos de Málaga.  
Aplicación de la microzonación de Málaga (escenario 1680)

Ref.	Monumento	Subzona	Intensidad
7	Iglesia de Nuestra Señora del Carmen	B3	9.0
9	Iglesia del convento de Santo Domingo	B3	9.0
10	Parroquia de San Juan Bautista	B2	9.5
11	Iglesia de San Pedro en los Percheles	B3	9.0
12	Iglesia de la Concepción	B2	9.5
14	Iglesia de la Divina Pastora y Santa Teresa de Jesús	B3	9.0
17	Parroquia de los Santos Mártires	B2	9.5
18	Iglesia de San Pablo	B3	9.0
21	Castillo de Gibralfaro	A	8.5
22	Alcazaba	A	8.5
24	Convento de San Onofre de Trinitarios Calzados	B4	8.5
25	Iglesia del Santo Cristo de la Salud (San Telmo)	B2	9.5
26	Iglesia del convento de Nuestra Señora de la Victoria	B1	9.0
27	Abadía de Santa Ana	B1	9.0
28	Parroquia de Sagrario	A	8.5
29	Casa Episcopal	B2	9.5
30	Colegio Seminario	B2	9.5
34	Convento de San Agustín	A	8.5
36	Santa iglesia de la Catedral / Basílica de la Encarnación	A	8.5
37	Parroquia de Santiago	A	8.0
38	Antiguo hospicio de San Julián	B2	9.5
39	Teatro Cervantes	B2	9.5
40	Casa de los Condes de las Navas	B2	9.5
41	Instituto de Turismo Andaluz	B3	9.0
42	Fundación Martí Torres	B2	9.5
43	Casa del Consulado	B2	9.5
44	Hogar de Jesús Abandonado	B2	9.5
45	Facultad de Filosofía y Letras	A	8.0
46	Museo Picasso	A	8.0
47	Museo de Artes Populares	B3	9.0
48	Antigua casa y taller del escultor Pedro de Mena	A	8.0
49	Palacio de los Condes de Villalcázar	B1	9.0
50	Gobierno Civil. Antigua Aduana	A	8.0
51	Banco de España	A	8.0
52	Ayuntamiento	A	8.0
53	Mercado Central de Atarazanas	B2	9.5
54	Capilla del Agua	B2	9.5
55	Iglesia y convento de las Dominicas (vulgo Catalinas)	B3	9.0
56	Archivo Municipal	B2	9.5
57	Antiguo Palacio Ugarte-Barrientos	B2	9.5
58	Sede de Gobernación de la Junta de Andalucía	B2	9.5
59	Banco Central	B2	9.5
60	Palacio de Salinas	B2	9.5
61	Cáritas Diocesana	B2	9.5
62	Antiguo Montepío de Viñeros	B2	9.5
63	Antiguo palacio de Valdeflores	B3	9.0
64	Antiguo Conservatorio María Cristina	B3	9.0
65	Alcubilla Mayor del acueducto de San Telmo	B3	9.0
66	Antigua Gota de Leche	B3	9.0
67	Palacio Zea Salvatierra	A	8.0
68	Antiguo Palacio del Marqués de la Sonora	A	8.0
69	Teatro romano	A	8.0
70	Iglesia de San Lázaro	B2	9.5
71	Rectorado de la Universidad de Málaga	A	8.0

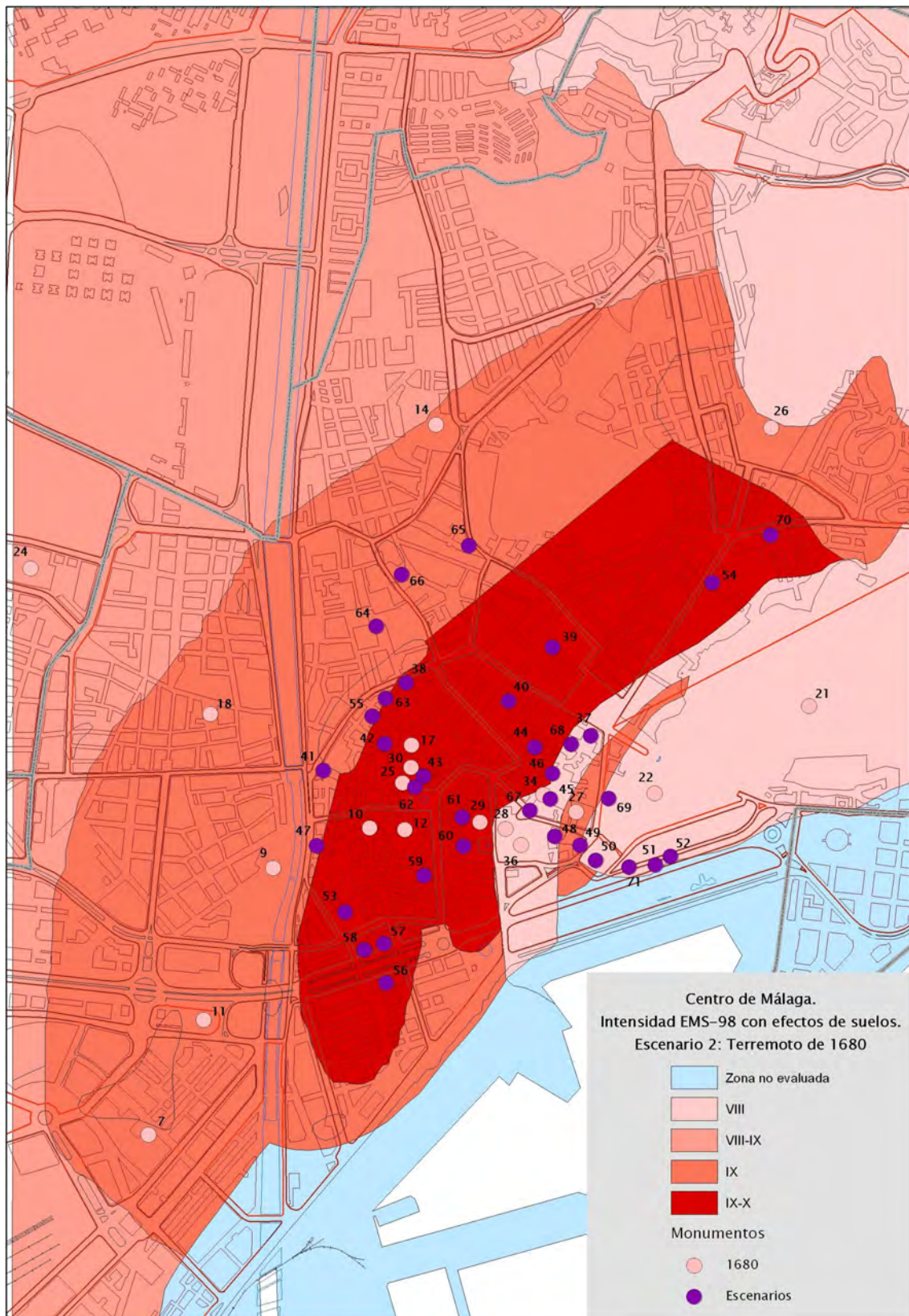


Figura 6.6. Monumentos de Málaga en el escenario determinista basado en el terremoto de 1680



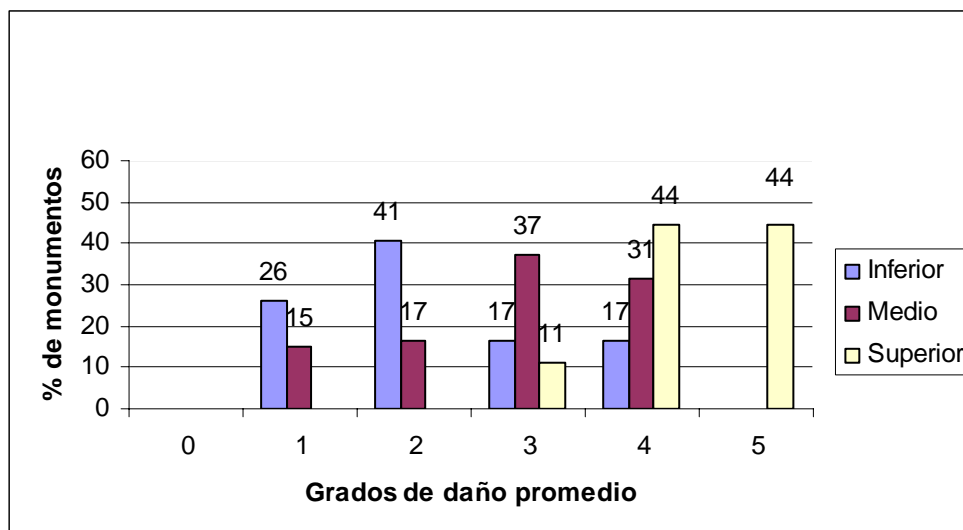


Figura 6.7. Distribución de los grados de daño promedio en los monumentos de Málaga (escenario 1680)

Los 12 monumentos con mayores grados de daño medios se muestran en la figura 6.8. Diez de ellos corresponden a iglesias, además de las únicas torre y ermita consideradas en este estudio. Utilizando los índices de vulnerabilidad medios, la mayoría de estos monumentos presentan grados de daño esperados alrededor de 4, que corresponde a daños muy graves. Si se tienen en cuenta los índices de vulnerabilidad superiores, todos los monumentos presentan grados de daño 5, que indica una completa destrucción de los mismos. Estos resultados indican que existe una probabilidad de colapso en estos monumentos si sucediera un terremoto como el de 1680, lo que muestra un peligro preocupante en el patrimonio malagueño. La aparición de las tipologías de la torre y la ermita se debe a que se trata de las tipologías de mayores índices de vulnerabilidad después de las iglesias, luego no es de extrañar que en la figura 6.8 aparezcan las tres tipologías más vulnerables: iglesias, torres y ermitas.

#### 6.4.2. Probabilidades de daño de los monumentos de Málaga

Del mismo modo que en el capítulo anterior, se han hallado las probabilidades de daño para cada uno de los 54 monumentos estudiados y los seis grados de daño (anexo XI).

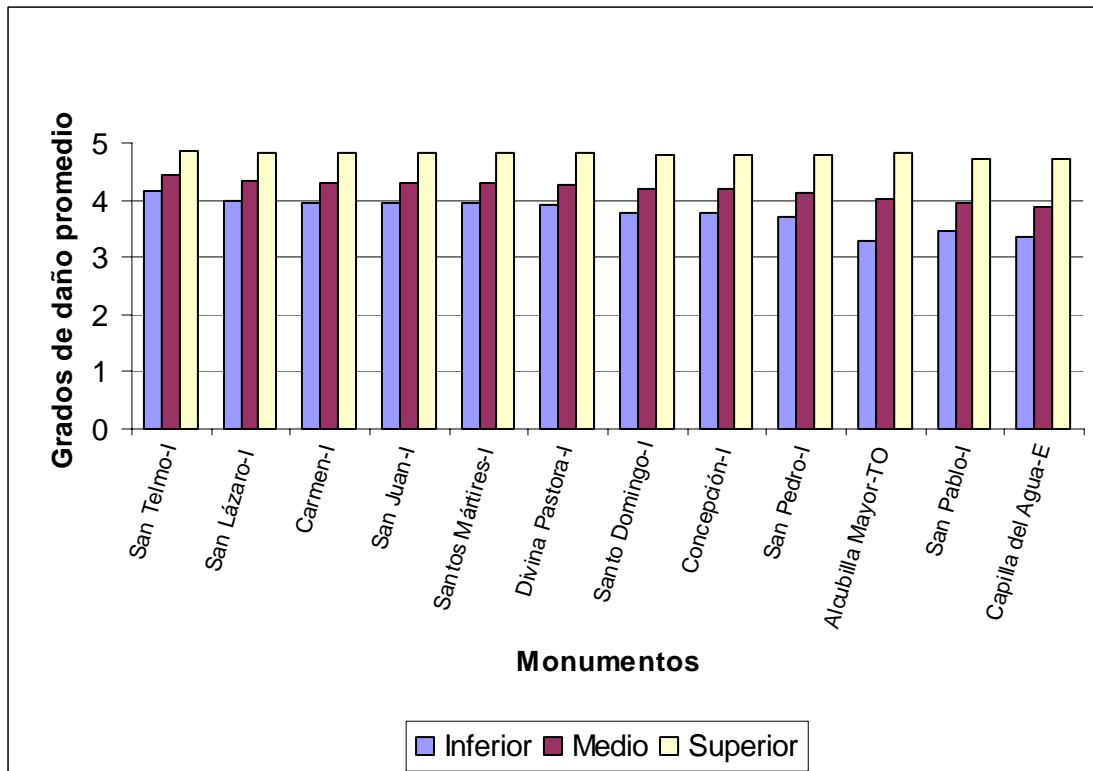


Figura 6.8. Monumentos con mayores grados de daño promedio a partir de los índices de vulnerabilidad medios (escenario 1680)

En la figura 6.9 se muestra la distribución de los monumentos en función de su probabilidad de daño, obtenidas a partir de los índices de vulnerabilidad inferior, medio y superior. Se observa que, si se utilizan los índices de vulnerabilidad medios, la mayor parte de los monumentos presentan una baja probabilidad de colapso. Sin embargo, el 13% de los monumentos podrían tener una probabilidad del 40-50% de ser completamente destruidos. Por otro lado, las probabilidades de sufrir daños moderados ( $k=2$ ), graves ( $k=3$ ), o muy graves ( $k=4$ ), son moderadas, y existe una muy baja probabilidad de sufrir daños ligeros ( $k=1$ ), o no sufrir daños ( $k=0$ ).

Si consideramos las probabilidades a partir de los índices de vulnerabilidad superiores, este escenario muestra resultados un tanto descorazonadores, pues la mayor probabilidad (del 50% al 90%), se da para el mayor daño ( $k=5$ ), y más del 16% de los monumentos presentan una probabilidad del 80-90% de sufrir una completa destrucción. Además, existe una probabilidad del 30-40% de que el 50% de monumentos sufran grados de daño 4. Por tanto, puede decirse que la posibilidad de sufrir daños graves, muy graves o el colapso total de los monumentos de Málaga es una realidad.

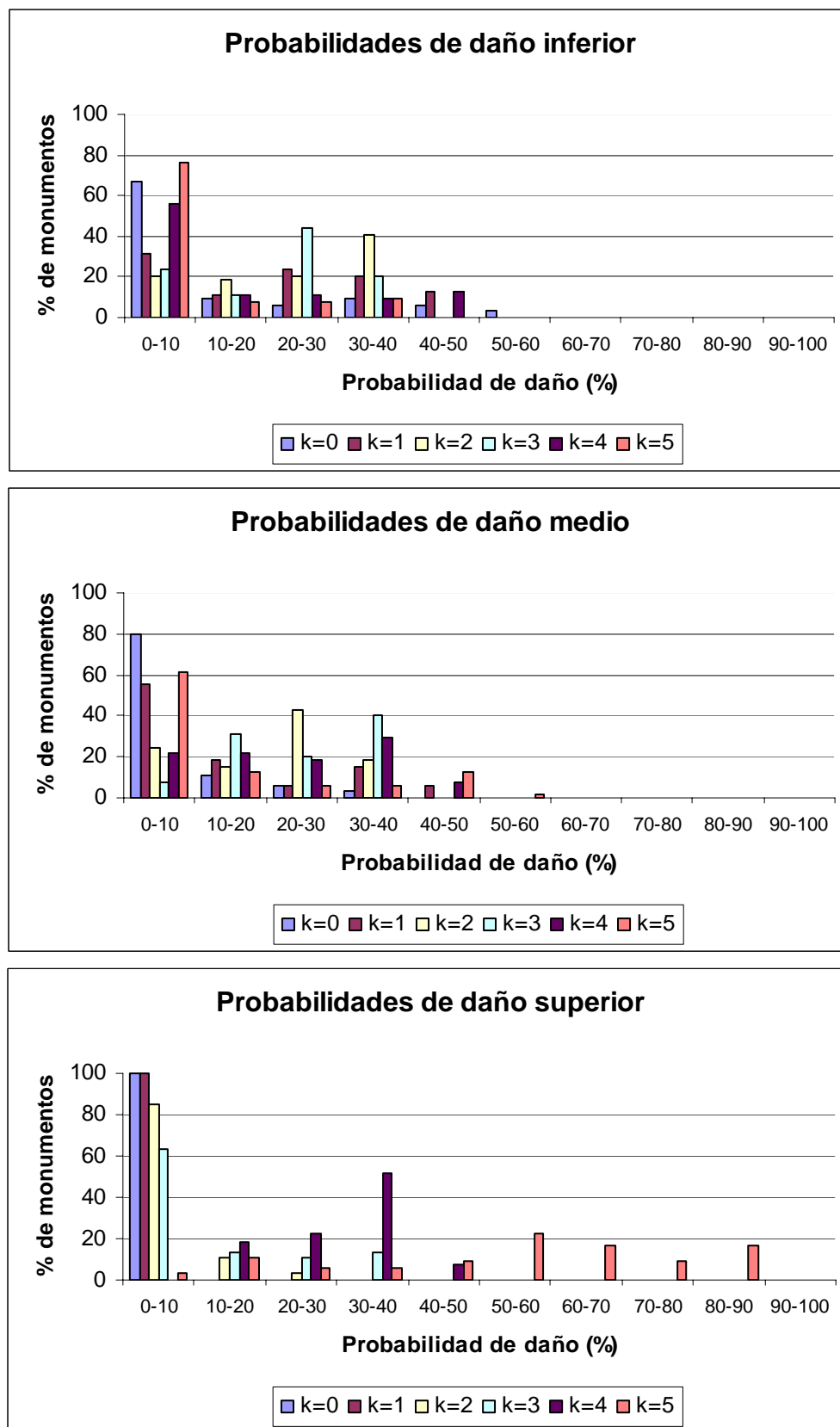


Figura 6.9. Probabilidades de daño utilizando los índices de vulnerabilidad inferior (arriba), medio (intermedio) y superior (abajo) (escenario 1680)

En las figuras 6.10a y 6.10b se muestran los 12 monumentos con mayor probabilidad de sufrir daños. En cada uno de ellos se indica la probabilidad para cada uno de los seis grados de daño de la escala EMS-98, calculados a partir de los índices de vulnerabilidad medios (figura 6.10a), y superiores (figura 6.10b). Estas probabilidades se han hallado para los grados de daño graves, muy graves o colapso total ( $k > 2$ ). Se observa cómo, al igual que en el estudio de los 12 monumentos con mayores grados de daño, de los 12 edificios, hay 10 iglesias, una torre y una ermita, que constituyen las tres tipologías más vulnerables. En la figura 6.10b se observa cómo existe una probabilidad muy alta de que estos monumentos sean completamente destruidos si ocurre un sismo como el de 1680, una conclusión importante que debe ser tenida en cuenta.

Una vez halladas las probabilidades de daño, se han obtenido los grados de daño más probables de cada monumento, utilizando los índices de vulnerabilidad medios. Estos valores se muestran en la figura 6.11, en la que se localizan los monumentos sobre el plano de la ciudad, clasificados en función de su grado de daño medio más probable. Todos los edificios presentan algún tipo de daño esperado: ligeros, moderados o graves. Sin embargo, hay monumentos cuyos daños esperados son muy graves o incluso que provocarían la destrucción total. Se observa cómo estos grados de daño esperados de 4 y 5 se encuentran en las zonas de mayores intensidades (IX-X y IX), de este escenario sísmico. La única excepción se debe a la catedral de Málaga (nº36), con un grado de daño esperado alto ( $k=4$ ) y situado en una zona de intensidad VIII. Ya se ha comentado varias veces a lo largo de este trabajo cuál es el problema de este monumento. Si ocurriera en Málaga un terremoto de las características del sucedido en 1680, posiblemente los 54 monumentos analizados sufrirían algún tipo de daño.

Para los monumentos que fueron dañados en 1680, se ha realizado una comparación entre los grados de daño más probables y los daños observados. En la figura 6.12 se muestra la localización de los monumentos afectados y se indica si la diferencia entre ambos daños es nula (verde), de un grado (amarillo), o de más de un grado (rojo). Se observa cómo una parte importante de los edificios dañados en 1680 “reproducirían” los mismos daños si se diera este escenario sísmico, o a lo sumo la diferencia estaría en un grado. Los únicos monumentos en los que la diferencia entre el grado de daño esperado y observado es de más de un grado son los castillos (nº21 y nº22), la catedral (nº36) (cuya problemática se debe a la falta de concordancia entre las tipologías dadas por Lagomarsino *et al.* (2003) y las de estos edificios), y la iglesia de la

Compañía de Jesús (ahora del Santo Cristo de la Salud, nº25), cuya tipología cambió desde 1680, por lo que es lógico que los resultados no sean tan satisfactorios.

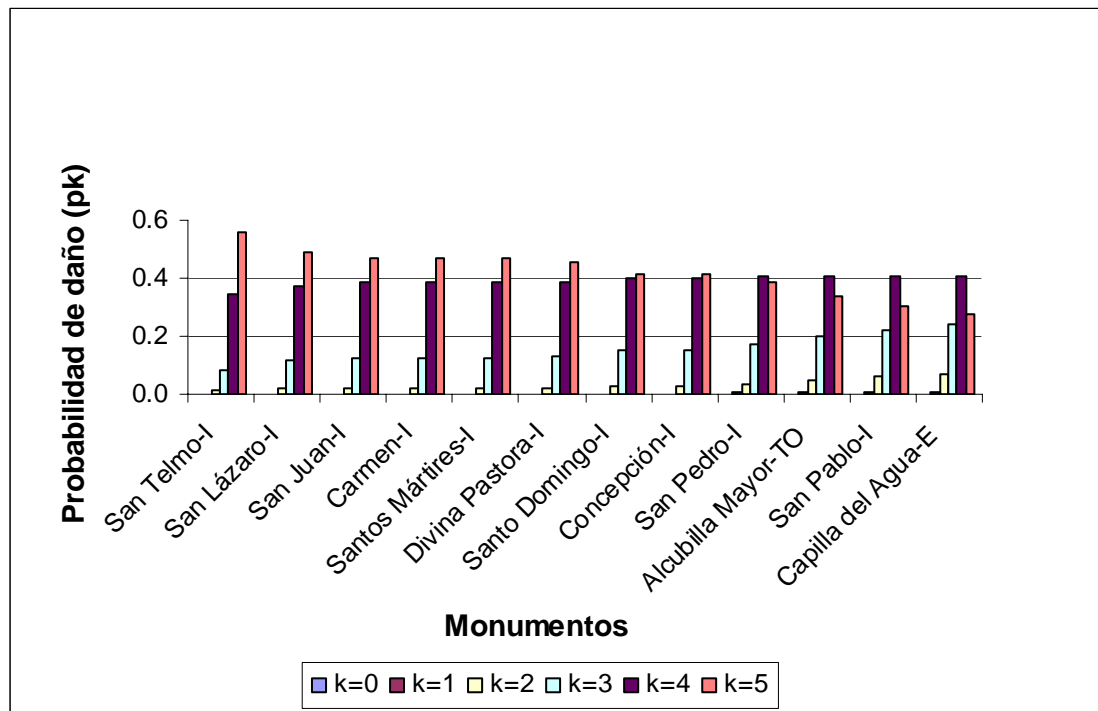


Figura 6.10a. Monumentos con mayores probabilidades de daño promedio a partir de los índices de vulnerabilidad medios (escenario 1680)

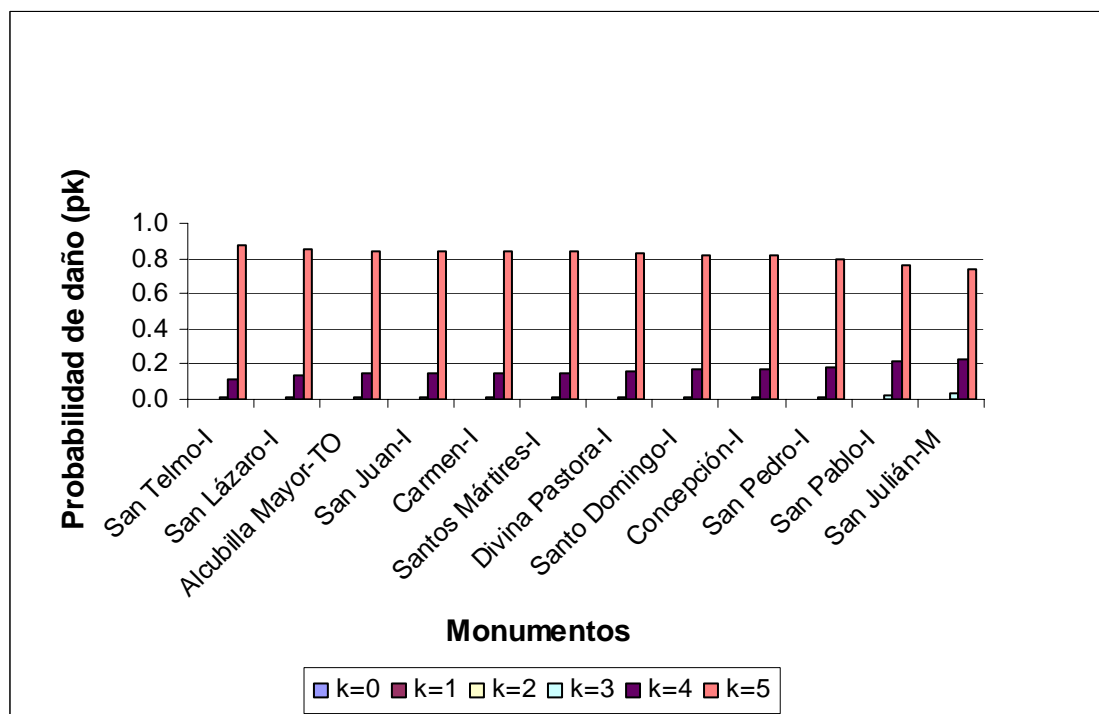


Figura 6.10b. Monumentos con mayores probabilidades de daño promedio a partir de los índices de vulnerabilidad superiores (escenario 1680)

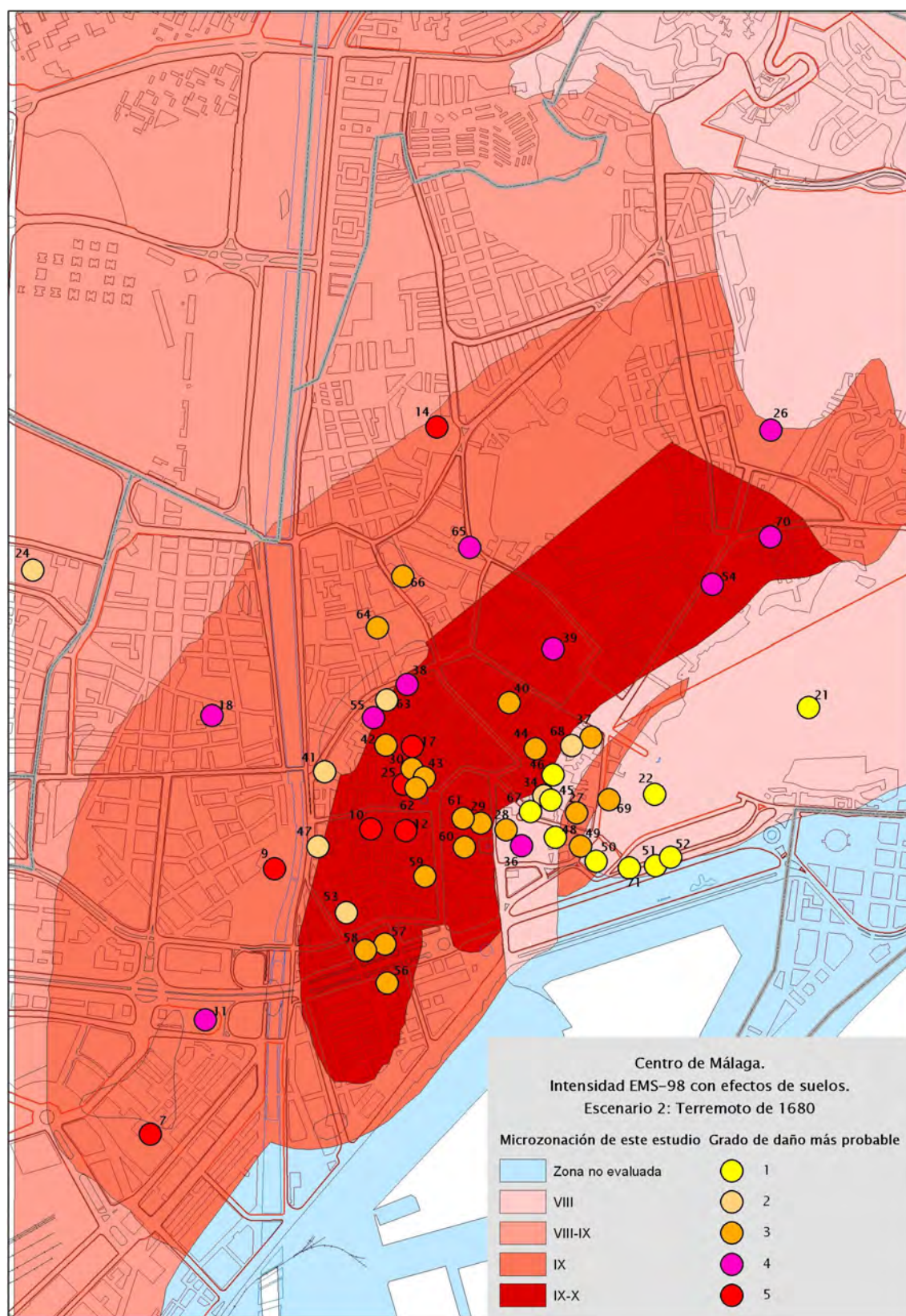


Figura 6.11. Distribución de los grados de daño medio más probables de los monumentos sobre el plano de la ciudad de Málaga (escenario 1680)



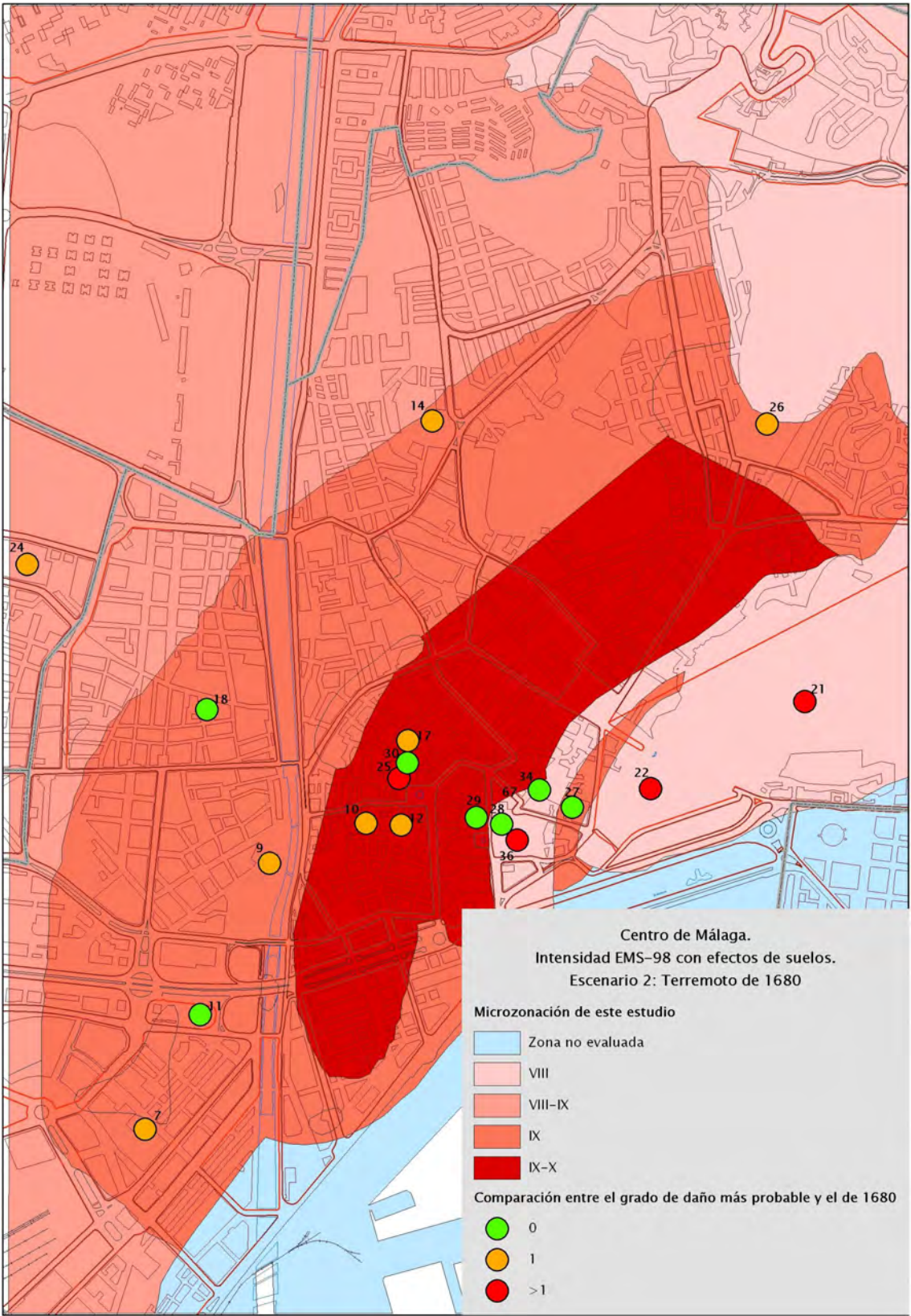


Figura 6.12. Comparación entre los grados de daño medios más probables y los daños observados en 1680 (escenario 1680)

Conviene añadir un par de comentarios acerca de la elección de las tipologías de los monumentos. En primer lugar, la existencia de algunos monumentos que “no están contemplados” en la metodología de los índices de vulnerabilidad utilizada. Tal es el caso del Mercado Central de Atarazanas (ref.53), que se ha clasificado como “palacio” a falta de una tipología más adecuada. Sin embargo, un mercado es un edificio hueco que probablemente tendría un índice de vulnerabilidad mayor que un palacio. Esto indica que la vulnerabilidad de este edificio (con un grado de daño medio más probable de 2, correspondiente a daños moderados), podría estar subestimada.

Por otro lado, varios de los palacios estudiados están destinados en la actualidad a viviendas. Sin embargo, las tipologías dadas por Lagomarsino *et al.* (2003) no distinguen entre edificios y palacios. Un palacio habilitado para albergar varias viviendas suele reformarse de tal forma que presenta características distintas a un palacio: muchos más baños y cocinas, más bajantes de aguas, etc. Se cree que este hecho cambiaría notablemente su vulnerabilidad, y que debería ser tenido en cuenta. Por ello, algunos de los palacios estudiados podrían ser más vulnerables de lo presentado en este estudio por el hecho de estar habilitados como viviendas. Tal es el caso, por ejemplo, de la Casa de los Condes de las Navas (nº40), el Instituto de Turismo Andaluz (nº41), la antigua casa del escultor Pedro de Mena (nº48), o el antiguo palacio del Marqués de la Sonora (nº68).

### 6.4.3. Conclusiones

Los efectos debidos a un escenario determinista en Málaga basado en el terremoto de 1680 son un tanto alarmistas: los edificios sentirían intensidades de hasta IX-X, y las probabilidades de sufrir la destrucción total o daños muy graves en algunos monumentos son elevadas. Sin embargo, los resultados no deberían sorprendernos demasiado, pues se conocen los efectos que produjo el sismo del siglo XVII en los edificios emblemáticos malagueños. Además, el escenario se basa en un terremoto que tuvo una intensidad de VIII-IX en Málaga y un epicentro a menos de 25km de la ciudad. Más aún, los monumentos estudiados se encuentran en una zona en la que las amplificaciones del suelo en términos de intensidad son inusualmente elevadas, con valores de +1.0 y +1.5, posiblemente por encontrarse en zonas de transición entre el



terreno sedimentario cercano al río Guadalmedina y el basamento rocoso de la colina de la Alcazaba, con altos contrastes en las velocidades de cizalla.

Las iglesias, la torre y la ermita estudiadas se muestran como los edificios más vulnerables de este escenario, con altas probabilidades de sufrir grados de daño 4 y 5. Por tanto, es a estos monumentos a los que se debe prestar especial atención en las labores de refuerzo y conservación del patrimonio malagueño, para evitar su posible pérdida en caso de ocurrir un terremoto en la región como el sucedido a finales del siglo XVII.

### 6.5. Escenario probabilista: NCSE-02

En este segundo escenario el planteamiento es distinto al caso anterior: en lugar de basarlo en un terremoto determinado ocurrido en el pasado, se utiliza la norma sismorresistente española NCSE-02, que, para un periodo de retorno de 500 años, considera que la ciudad de Málaga se vería afectada por una intensidad de VII-VIII en la escala EMS-98. Tomando este valor de partida, se aplican las amplificaciones de intensidad determinadas en el capítulo 4 de este trabajo, obteniendo de esta forma las intensidades que afectarían a cada subzona del centro de la ciudad, donde se localizan los monumentos objeto de estudio (tabla 6.5). En la tabla 6.6 y la figura 6.13 se muestran las intensidades específicas que afectarían a cada monumento en este escenario. Se observa cómo las mayores intensidades son de IX, medio grado menores que las del escenario determinista del apartado anterior. Por tanto, se esperan daños en los monumentos ligeramente menores que los debidos al escenario basado en el sismo de 1680.

Tabla 6.5. Intensidades para cada tipo de suelo (escenario NCSE-02)

Subzona	Amplificación	$I_{escNCSE-02}$
A	+0.0	7.5
B1	+1.0	8.5
B2	+1.5	9.0
B3	+1.0	8.5
B4	+0.5	8.0
C	+0.5	8.0

### 6.5.1. Grados de daño de los monumentos de Málaga

Del mismo modo que en el escenario determinista, se han hallado los grados de daño promedio para cada monumento, a partir de los índices de vulnerabilidad inferior, medio y superior. Los valores para cada edificio se muestran en el anexo XII. El porcentaje de monumentos de Málaga susceptible de sufrir daño en función del grado de daño promedio puede observarse en la figura 6.14. En ella se observa que el porcentaje de monumentos con grado de daño medio entre 1 y 4 es muy parecido (entre el 20% y el 30%). Considerando los grados de daño a partir de los índices de vulnerabilidad superiores, el 54% de los monumentos presentaría daños de grado 4 (muy graves), habiendo un 26% de edificios con grados de daño esperados de 5, correspondientes al colapso de las estructuras. Como se ve, este escenario presenta daños menores que en el caso determinista, con una disminución de los edificios con grados de daño 5 (del 44% al 26%), a costa de un aumento de los de grados de daño 4 (del 44% al 54%).

En la figura 6.15 se muestran los grados de daño promedio para los 12 monumentos más afectados. Se observa que los monumentos más vulnerables son los mismos que los del escenario determinista, y prácticamente en el mismo orden. También en este escenario, los edificios con mayores daños esperados del centro de Málaga son 10 de las 14 iglesias estudiadas, la Alcubilla Mayor (torre) y la Capilla del Agua (ermita). Considerando los índices de vulnerabilidad medios, los grados de daño esperados oscilan entre 3.5 y 4.2, y a partir de los índices de vulnerabilidad superiores, se esperarían grados entre 4.5 y 5.0. Se trata, de nuevo, de un escenario que predice grandes daños en los monumentos, si bien algo menores que en el escenario determinista.

Tabla 6.6. Monumentos de Málaga.  
Aplicación de la microzonación de Málaga (escenario NCSE-02)

Ref.	Monumento	Subzona	Intensidad
7	Iglesia de Nuestra Señora del Carmen	B3	8.5
9	Iglesia del convento de Santo Domingo	B3	8.5
10	Parroquia de San Juan Bautista	B2	9.0
11	Iglesia de San Pedro en los Percheles	B3	8.5
12	Iglesia de la Concepción	B2	9.0
14	Iglesia de la Divina Pastora y Santa Teresa de Jesús	B3	8.5
17	Parroquia de los Santos Mártires	B2	9.0
18	Iglesia de San Pablo	B3	8.5
21	Castillo de Gibralfaro	A	8.0
22	Alcazaba	A	8.0
24	Convento de San Onofre de Trinitarios Calzados	B4	8.0
25	Iglesia del Santo Cristo de la Salud (San Telmo)	B2	9.0
26	Iglesia del convento de Nuestra Señora de la Victoria	B1	8.5
27	Abadía de Santa Ana	B1	8.5
28	Parroquia de Sagrario	A	8.0
29	Casa Episcopal	B2	9.0
30	Colegio Seminario	B2	9.0
34	Convento de San Agustín	A	8.0
36	Santa iglesia de la Catedral / Basílica de la Encarnación	A	8.0
37	Parroquia de Santiago	A	7.5
38	Antiguo hospicio de San Julián	B2	9.0
39	Teatro Cervantes	B2	9.0
40	Casa de los Condes de las Navas	B2	9.0
41	Instituto de Turismo Andaluz	B3	8.5
42	Fundación Martí Torres	B2	9.0
43	Casa del Consulado	B2	9.0
44	Hogar de Jesús Abandonado	B2	9.0
45	Facultad de Filosofía y Letras	A	7.5
46	Museo Picasso	A	7.5
47	Museo de Artes Populares	B3	8.5
48	Antigua casa y taller del escultor Pedro de Mena	A	7.5
49	Palacio de los Condes de Villalcázar	B1	8.5
50	Gobierno Civil. Antigua Aduana	A	7.5
51	Banco de España	A	7.5
52	Ayuntamiento	A	7.5
53	Mercado Central de Atarazanas	B2	9.0
54	Capilla del Agua	B2	9.0
55	Iglesia y convento de las Dominicas (vulgo Catalinas)	B3	8.5
56	Archivo Municipal	B2	9.0
57	Antiguo Palacio Ugarte-Barrientos	B2	9.0
58	Sede de Gobernación de la Junta de Andalucía	B2	9.0
59	Banco Central	B2	9.0
60	Palacio de Salinas	B2	9.0
61	Cáritas Diocesana	B2	9.0
62	Antiguo Montepío de Viñeros	B2	9.0
63	Antiguo palacio de Valdeflores	B3	8.5
64	Antiguo Conservatorio María Cristina	B3	8.5
65	Alcubilla Mayor del acueducto de San Telmo	B3	8.5
66	Antigua Gota de Leche	B3	8.5
67	Palacio Zea Salvatierra	A	7.5
68	Antiguo Palacio del Marqués de la Sonora	A	7.5
69	Teatro romano	A	7.5
70	Iglesia de San Lázaro	B2	9.0
71	Rectorado de la Universidad de Málaga	A	7.5

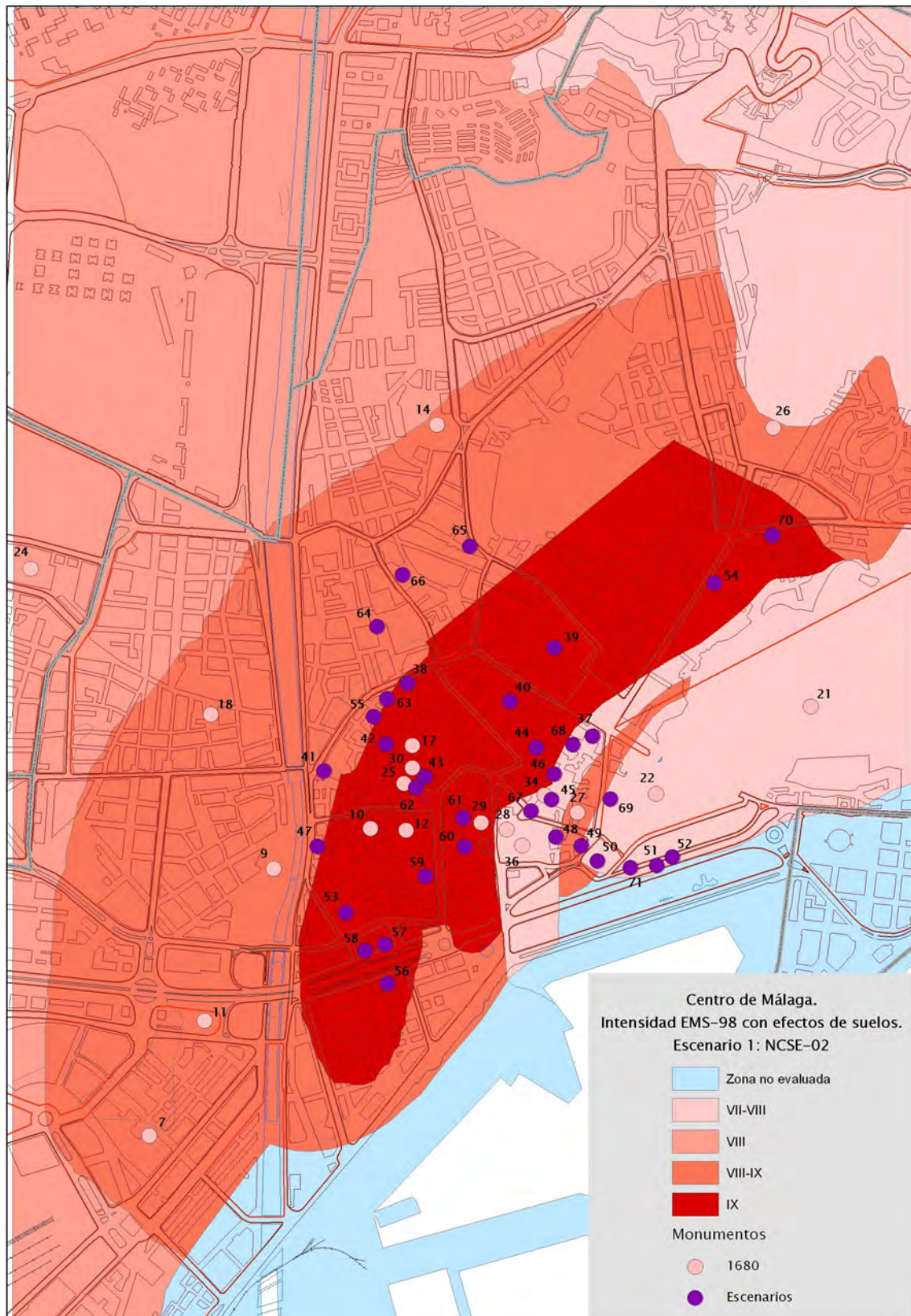


Figura 6.13. Monumentos de Málaga en el escenario probabilista basado en la norma sismorresistente NCSE-02

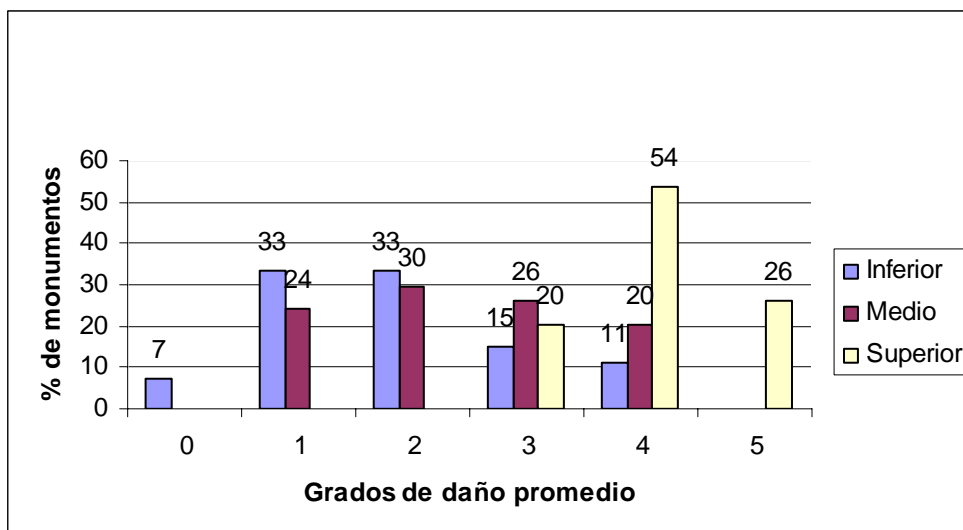


Figura 6.14. Distribución de los grados de daño promedio en los monumentos de Málaga (escenario NCSE-02)

### 6.5.2. Probabilidades de daño de los monumentos de Málaga

A partir de los grados de daño promedio de cada monumento se obtienen sus probabilidades de daño. Estos valores se muestran en el anexo XII.

En la figura 6.16 se muestra la distribución de los monumentos en función de su probabilidad de daño para este escenario, obtenidas a partir de los índices de vulnerabilidad inferior, medio y superior. Las probabilidades halladas utilizando los índices de vulnerabilidad medios indican que la mayor parte de los monumentos presentan probabilidades muy bajas de sufrir daños de grados 4 y 5. Sin embargo, del orden de 15% de los edificios presentan probabilidades entre el 30% y el 50% de sufrir ambos grados de daño. Por otro lado, la mayor parte de edificios presentan bajas probabilidades de sufrir daños ligeros ( $k=1$ ), y probabilidades moderadas de sufrir daños moderados ( $k=2$ ) y graves ( $k=3$ ).

En el caso de las probabilidades a partir de los índices de vulnerabilidad superiores, los daños aumentan significativamente, con valores del 30-40% de sufrir daños muy graves ( $k=4$ ), y un 16% de monumentos con muy altas probabilidades de sufrir una completa destrucción. Los resultados son, de nuevo, menos catastróficos que en el escenario determinista, pero aún así siguen siendo alarmantes.

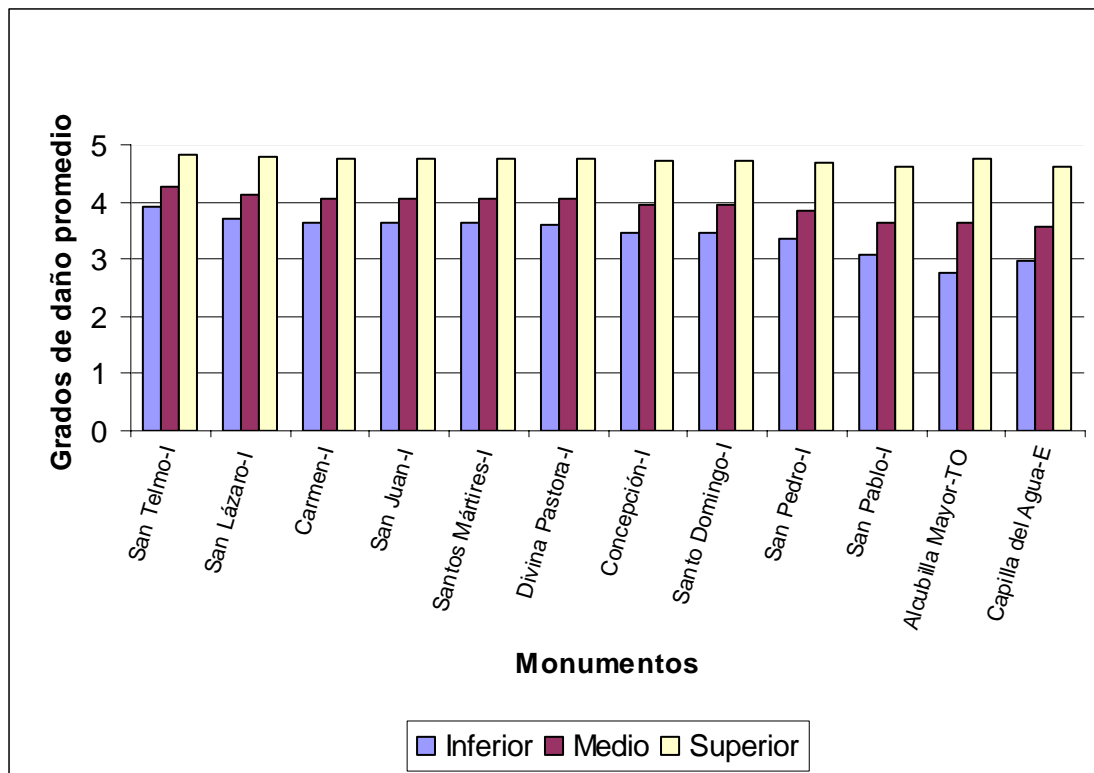


Figura 6.15. Monumentos con mayores grados de daño promedio a partir de los índices de vulnerabilidad medios (escenario NCSE-02)

Las probabilidades de los 12 monumentos con mayores probabilidades de daño a partir de los índices de vulnerabilidad medio y superior, se muestran en las figuras 6.17a y 6.17b, respectivamente. Utilizando los índices de vulnerabilidad medios, las mayores probabilidades de daño para estos 12 monumentos corresponden al grado 4, salvo en la iglesia de San Telmo, en la que las mayores probabilidades se obtendrían para el grado de daño 5. De nuevo, estos 12 monumentos con mayores probabilidades de daño corresponden a 10 de las 14 iglesias consideradas, la ermita y la torre.

Por último, y del mismo modo que en el escenario determinista, se determinan los grados de daño más probables a partir de los índices de vulnerabilidad medios (figura 6.18). En ella se observa cómo la gran mayoría de monumentos presentan daños de ligeros (grado 1), a graves (grado 3). Los monumentos con grados de daño esperados muy graves (grado 4), se encuentran en las zonas de intensidades IX y VIII-IX, las regiones de mayores intensidades en este escenario, y solamente un monumento tendría daños esperados de grado 5. Asimismo, se observa que en este escenario hay algún edificio sin daños esperados (grado 0), lo que no sucedía en el escenario determinista del apartado anterior.

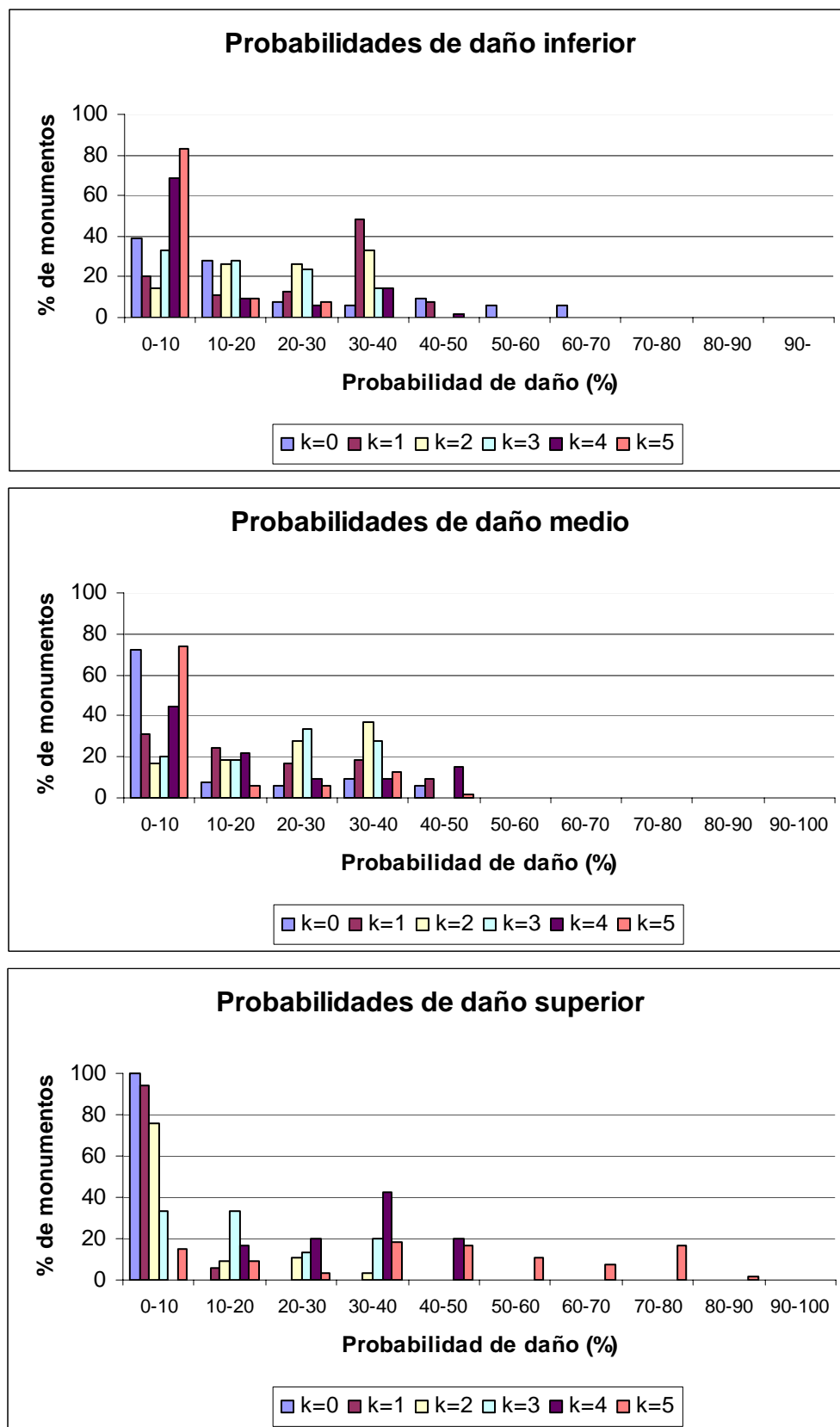


Figura 6.16. Probabilidades de daño utilizando los índices de vulnerabilidad inferior (arriba), medio (intermedio) y superior (abajo) (escenario NCSE-02)

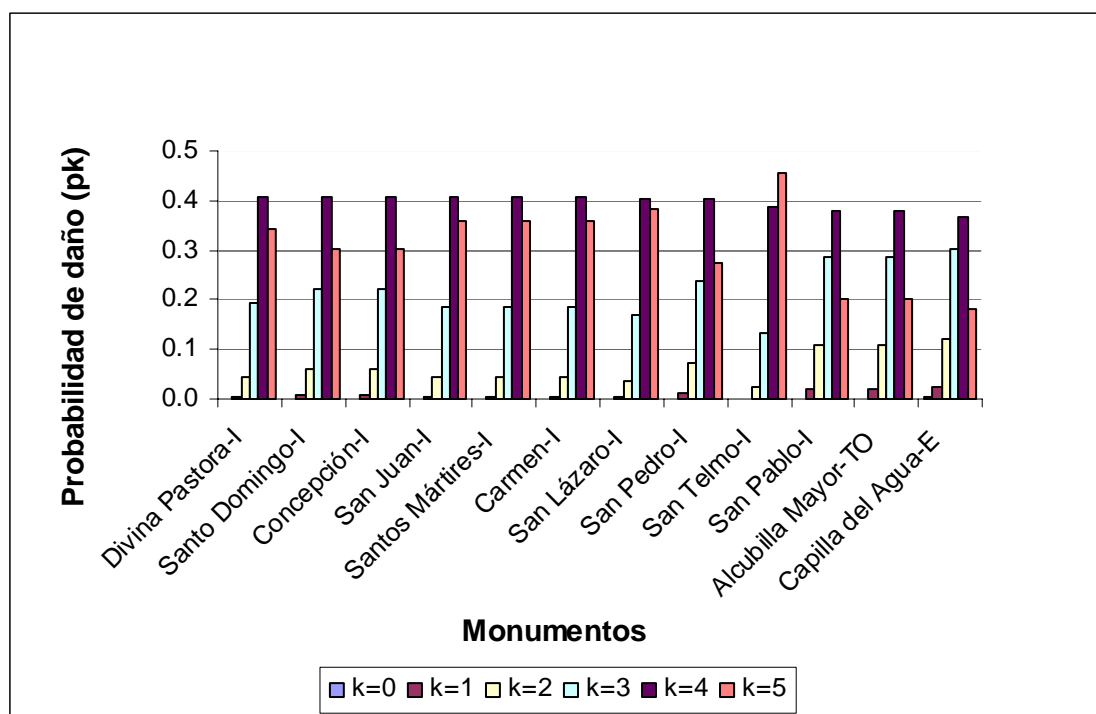


Figura 6.17a. Monumentos con mayores probabilidades de daño promedio a partir de los índices de vulnerabilidad medios (escenario NCSE-02)

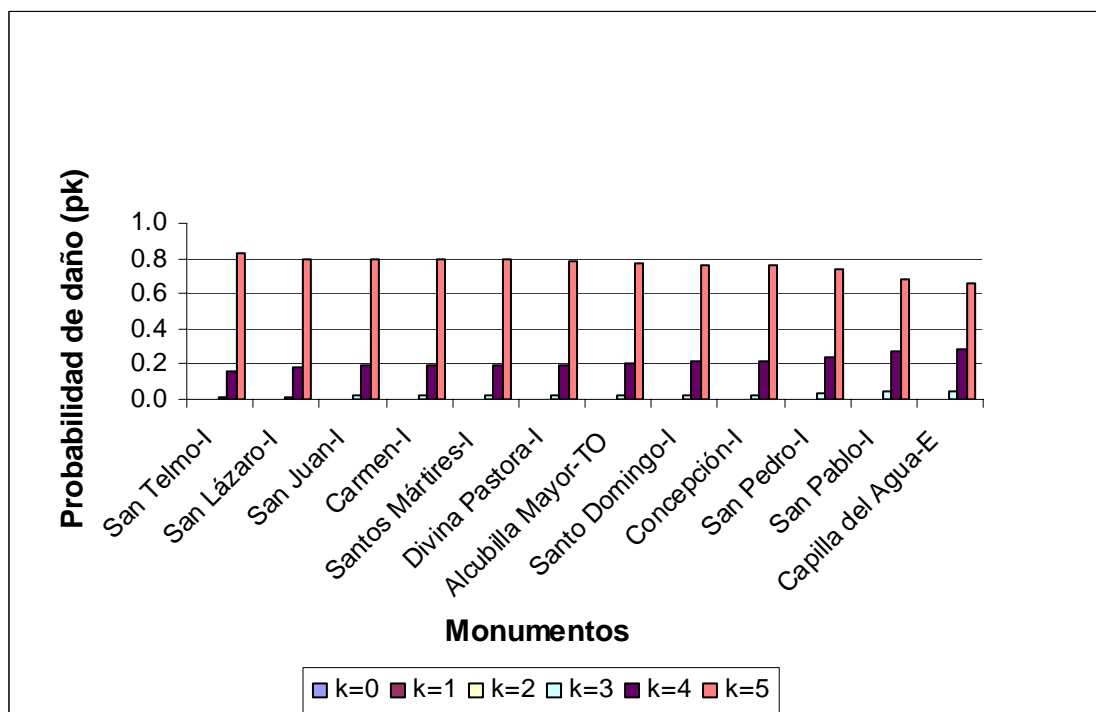


Figura 6.17b. Monumentos con mayores probabilidades de daño promedio a partir de los índices de vulnerabilidad superiores (escenario NCSE-02)



En los monumentos que fueron dañados en 1680 se puede realizar una comparación de los daños esperados con los observados, como se hizo en el escenario determinista. Estos resultados se muestran en la figura 6.19, donde se observa cómo existe una gran concordancia entre ambos tipos de resultados, coincidiendo los grados de daño esperados y observados en más monumentos que en el escenario determinista. De nuevo, y como sucedía en el escenario basado en el sismo de 1680, los únicos monumentos en los que ambos resultados difieren en más de un grado son la catedral, los dos castillos y la iglesia de la Compañía de Jesús, probablemente debido a los motivos ya explicados en este trabajo.

### **6.5.3. Conclusiones**

El escenario probabilista basado en la norma NCSE-02 propone intensidades del suelo máximas de IX en el centro de la ciudad de Málaga. Si bien la mayor parte de los monumentos de la ciudad tienen bajas probabilidades de presentar graves daños, un 13% de los mismos tendrían una probabilidad del 30-40% de ser completamente destruidos, y un 15% podrían presentar daños muy graves con una probabilidad del 40-50%. A efectos de conservación del patrimonio histórico malagueño, son cifras a tener en cuenta. Por otro lado, este escenario reitera el hecho de que las iglesias, ermitas y torres de la ciudad constituyen los monumentos más vulnerables, con probabilidades no desdeñables de sufrir daños de grado 4 en la escala EMS-98.

### **6.6. Comparación entre ambos escenarios sísmicos**

El estudio de los grados de daño esperados y sus probabilidades en los dos escenarios estudiados en el centro de Málaga, muestran claramente que el escenario determinista basado en el terremoto de 1680 sería más devastador para los monumentos de la ciudad que el escenario probabilista basado en la norma NCSE-02. Los resultados obtenidos en el presente estudio vienen a corroborar el estudio realizado por Irizarry *et al.* (2007) para edificios ordinarios, al aplicarlo a los daños en los edificios monumentales de la ciudad.

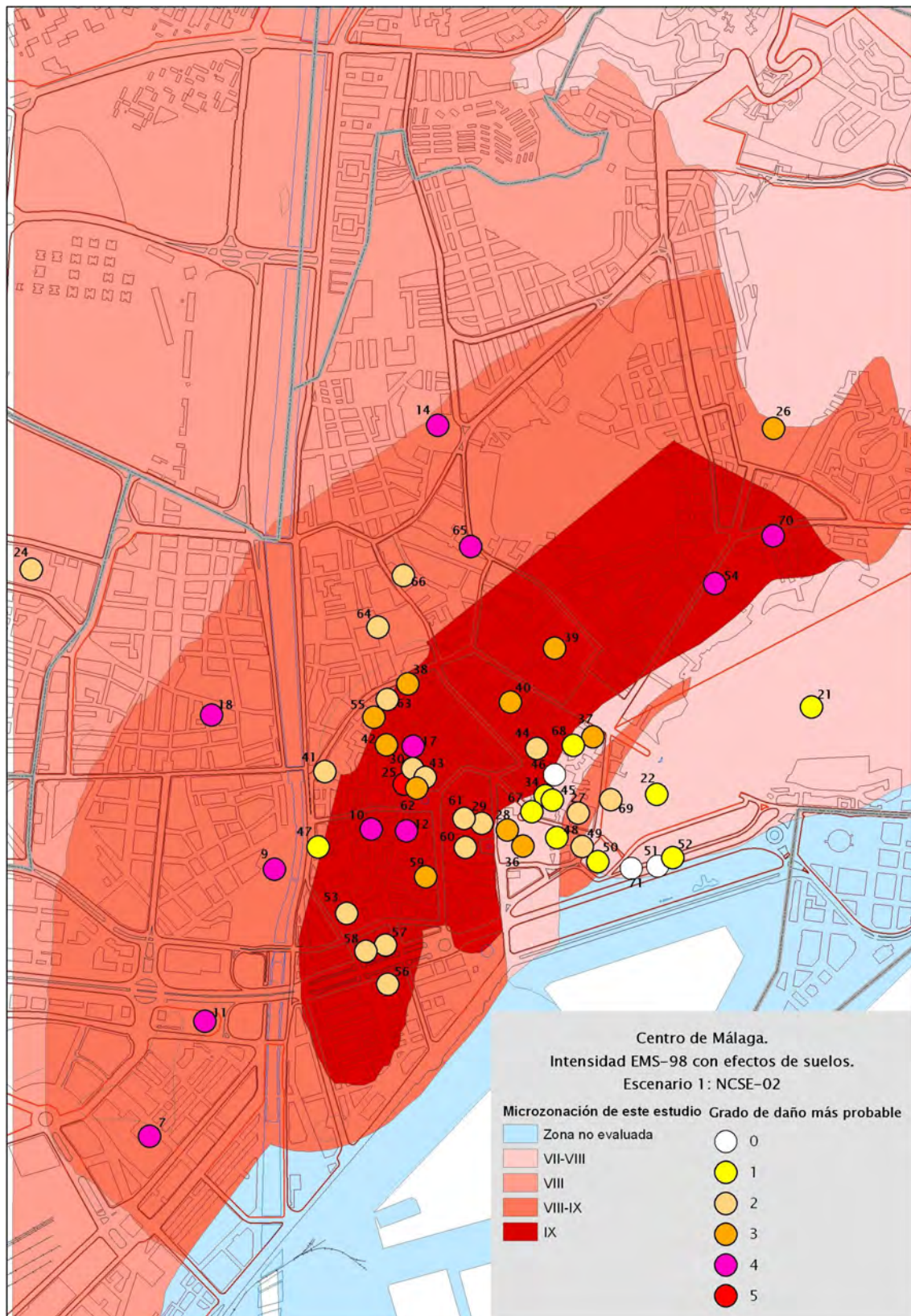


Figura 6.18. Distribución de los grados de daño medio más probables de los monumentos sobre el plano de la ciudad de Málaga (escenario NCSE-02)



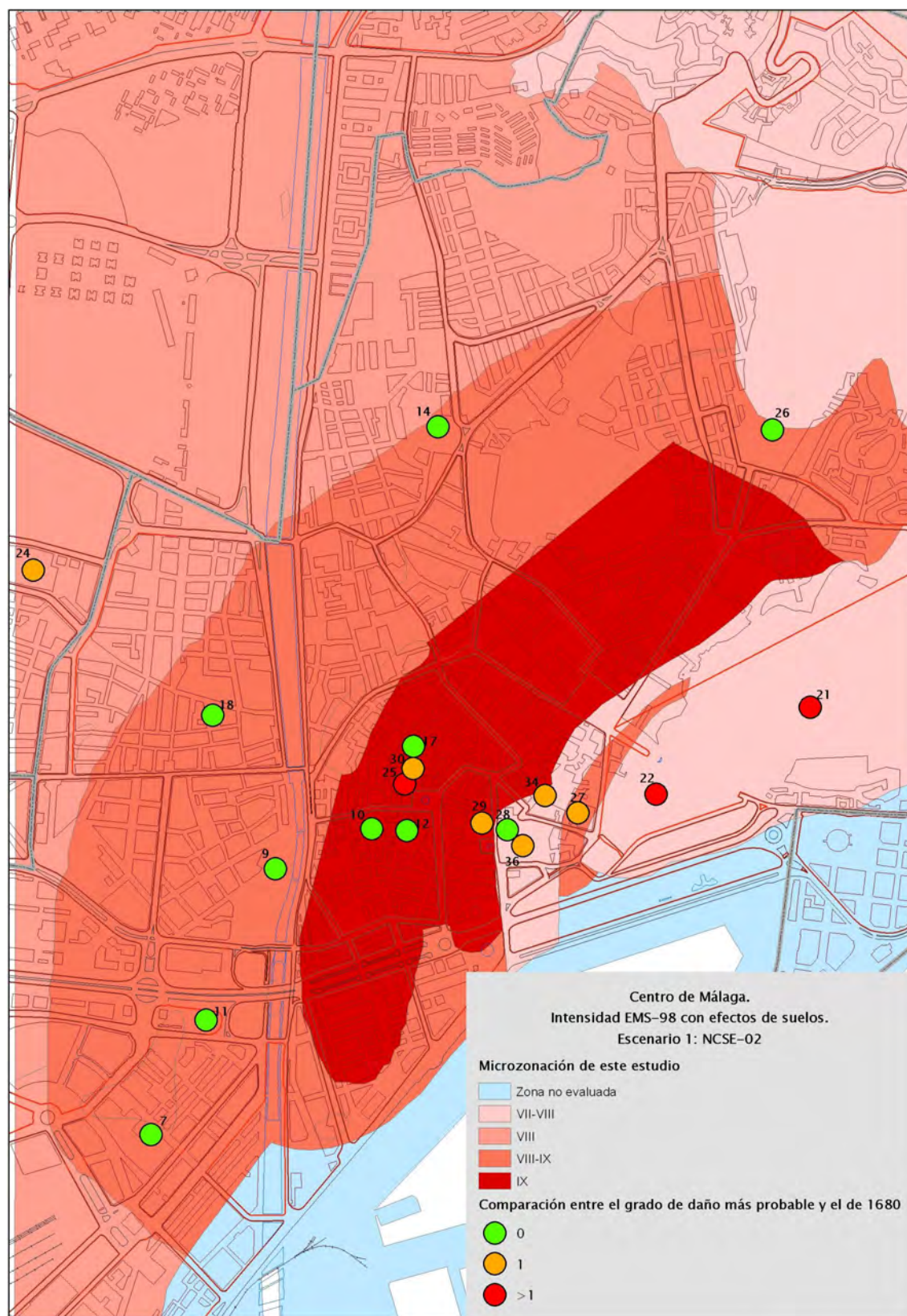


Figura 6.19. Comparación entre los grados de daño medios más probables y los daños observados en 1680 (escenario NCSE-02)

Una forma de cuantificar cuánto más dañino supondría el escenario determinista respecto del probabilista estudiados, puede realizarse obteniendo un grado de daño promedio global  $\mu_d$  para cada escenario:

$$(\mu_d)_{\text{escenario}} = \frac{\sum_{k=0}^5 kp_k}{100} \quad (6.1)$$

donde  $p_k$  es la probabilidad asociada al grado de daño  $k$ .

Realizando este cálculo para ambos escenarios se obtienen los siguientes resultados:

$$(\mu_d)_{1680} = 2.85 \quad ; \quad (\mu_d)_{NCSSE-02} = 2.43$$

Estos valores constituyen el grado de daño promedio de la mayoría de los monumentos en cada uno de los escenarios sísmicos, y muestran que existe una diferencia entre ambos casos del orden de medio grado. Esto muestra que, efectivamente, el escenario basado en el sismo de 1680 es más catastrofista que el basado en la norma sismorresistente española, con una diferencia de “tan sólo” de medio grado. Además, el estudio se ha realizado con 54 monumentos del centro de la ciudad. Un estudio de una mayor cantidad de monumentos podría reafirmar la diferencia entre ambos escenarios sísmicos.

Por último, debe resaltarse que entre los monumentos estudiados no sólo hay edificios que forman parte del patrimonio histórico malagueño, sino también varios museos e instituciones públicas, y también edificios vitales en los planes de emergencia tras la ocurrencia de un terremoto, tales como el Ayuntamiento de la ciudad, el Rectorado de la Universidad de Málaga o el Gobierno Civil, con daños esperados entre ligeros y moderados para ambos escenarios, lo que debe ser debidamente tenido en cuenta por las autoridades responsables.



---

---

*Capítulo 7*

*Conclusiones*

---

---



El objetivo de esta tesis es realizar un análisis del riesgo sísmico en la ciudad de Málaga teniendo en cuenta los daños ocasionados en los monumentos malagueños durante el terremoto de 1680. La aplicación de los estudios de riesgo sísmico a los monumentos españoles es poco frecuente a día de hoy, siendo el presente trabajo uno de los primeros estudios de la vulnerabilidad de monumentos en centros urbanos españoles. Si bien los estudios de peligrosidad y vulnerabilidad de edificios ordinarios son esenciales en la prevención de daños en el futuro, se cree que, paralelamente a ellos, deberían realizarse estudios de vulnerabilidad de los monumentos españoles, comenzando por aquellas regiones y centros urbanos, que, como Málaga, han sufrido terremotos en el pasado con graves consecuencias en sus edificios monumentales.

Las principales conclusiones y recomendaciones, así como la propuesta de trabajos futuros, son:

### **Conclusiones**

#### **a) Efecto de sitio**

- 1) Se propone una nueva microzonación del centro de Málaga, en la que se distinguen 6 subzonas de características geológicas, topográficas y geotécnicas distintas. Tres subzonas (B1, B2 y B3), son nuevas respecto de la microzonación de la ciudad obtenida por Clavero y Ramos (2005) y Macau (2008), y presentan mayores amplificaciones del suelo que el resto de subzonas, probablemente debido a los altos contrastes de cizalla entre el suelo y el basamento rocoso, al tratarse de regiones de transición entre la roca aflorante y el terreno sedimentario a orillas del Guadalmedina.
- 2) Las altas amplificaciones en intensidad de las zonas B1, B2 y B3, de +1.0, +1.5 y +1.0, respectivamente, las convierte en las regiones más vulnerables del centro de Málaga. Estos resultados están de acuerdo con los daños sufridos por los



monumentos durante el sismo de 1680, pues la zona B2 presentó el mayor porcentaje de edificios con grados de daño 4 y 5.

- 3) Se ha obtenido una buena correlación entre los valores de las frecuencias fundamentales del suelo calculadas a partir de las medidas de ruido sísmico (método experimental de Nakamura), y las de los sondeos más cercanos a dichas medidas obtenidas con el método numérico 1D lineal equivalente (programa *ProShake*).
- 4) Existe una clara diferenciación en las frecuencias fundamentales, amplificaciones del suelo y profundidades del basamento entre la zona este del centro de Málaga (en la colina sobre roca donde se encuentra la Alcazaba), y la zona oeste, en el terreno sedimentario situado a orillas del río Guadalmedina. La zona al este está caracterizada por altas frecuencias fundamentales del suelo ( $>5.0\text{Hz}$ ), bajas amplificaciones y bajas profundidades del basamento ( $<10\text{m}$ ). Por otro lado, la zona cercana al río Guadalmedina se caracteriza por presentar frecuencias fundamentales del orden de  $1.0\text{Hz}$ , mayores amplificaciones del suelo y grandes profundidades del basamento ( $60\text{-}70\text{m}$ ).
- 5) La utilización de acelerogramas teóricos generados mediante el método de las funciones de Green empíricas y el método de la discretización del número de onda es posible a bajas frecuencias. Sin embargo, ambas metodologías presentan una pérdida de altas frecuencias que lleva como consecuencia la pérdida de amplitudes, vitales en los estudios de efectos locales del suelo.

#### **b) Vulnerabilidad**

- 1) El método de los índices de vulnerabilidad propuesto por Lagomarsino *et al.* (2003), ha resultado ser una metodología adecuada a los monumentos de la ciudad de Málaga, existiendo un gran acuerdo entre los daños esperados y observados, especialmente en la tipología de las iglesias.
- 2) Los casos en que existe discrepancia entre los daños esperados y observados pueden explicarse por la falta de acuerdo entre las tipologías de los monumentos y las propuestas en la metodología. Son significativos estos desajustes en la

catedral de Málaga y los castillos de Gibralfaro y la Alcazaba, que ponen de relieve la importancia de la adecuación de las tipologías a los monumentos de estudio.

- 3) De los 19 monumentos estudiados, 13 presentan unos grados de daño esperados de 3 y 4, correspondientes a daños graves o muy graves. Considerando las incertidumbres en los índices de vulnerabilidad, aparecen altas probabilidades de sufrir colapso total en 6 de los 19 monumentos estudiados. Las iglesias de San Juan, Santos Mártires, los Capuchinos, el Carmen y la Compañía de Jesús presentan los mayores grados de daño esperados, en torno a grado 4.
- 4) Se ha demostrado que es necesario considerar los efectos de suelos para obtener buenos resultados en la vulnerabilidad de los monumentos, alejándose los resultados esperados de los observados si no se considera microzonación o si se considera una microzonación simplificada dividida en suelo y roca.
- 5) Este tipo de estudios de efecto de sitio y vulnerabilidad a escala local se consideran vitales para la conservación del patrimonio histórico, artístico y cultural así como para la gestión de planes de emergencia.

#### **c) Escenarios sísmicos**

- 1) El escenario determinista basado en el sismo de 1680 presenta resultados más catastróficos para los monumentos malagueños que el escenario probabilista basado en la norma NCSE-02, con probabilidades moderadas de sufrir daños muy graves o incluso la destrucción total de algunos edificios. Sin embargo, ambos escenarios presentan probabilidades importantes de sufrir daños. Hay que tener en cuenta que los monumentos sentirían unas intensidades máximas altísimas, de IX-X en el primer caso y IX en el segundo.
- 2) Las iglesias, la ermita y la torre estudiadas han mostrado ser los edificios más vulnerables. Para su conservación y prevención de posibles daños en el futuro, se recomienda que se lleven a cabo las técnicas de refuerzo antisísmico adecuadas en estas estructuras.

- 3) Debe destacarse que entre los edificios estudiados no sólo se encuentran monumentos que forman parte del patrimonio malagueño, sino también edificios tales como el Ayuntamiento, el Banco Central o el Rectorado de la Universidad de Málaga, cuyo buen funcionamiento es vital en la gestión de planes de emergencia en la ciudad. Considerando el escenario determinista, los grados de daño medio más probables corresponderían a daños ligeros en el Rectorado, daños moderados en el caso del Ayuntamiento, y daños graves en el Banco Central, lo que da idea de la importancia de este tipo de estudios para prevenir posibles fallos en situaciones de emergencia debido a los daños de edificios esenciales en la gestión de los mismos.

### **Futuras líneas de investigación**

Como recomendaciones y trabajos futuros se proponen las siguientes actuaciones:

#### **a) Efecto de sitio**

- Utilización de otro tipo de relaciones empíricas entre la intensidad de Arias y la intensidad macrosísmica específicos de la zona de estudio, a partir de registros de aceleración en la región, en lugar de relaciones para una región tan amplia como es la del Mediterráneo utilizada en este estudio.
- Aplicación de metodologías más sofisticadas para la generación de acelerogramas teóricos, que incluyan métodos estocásticos para evitar la pérdida de altas frecuencias. Una posible opción es utilizar métodos híbridos que combinan el método de las funciones de Green empíricas a bajas frecuencias con métodos estocásticos a altas frecuencias, como por ejemplo el propuesto por Mena *et al.* (2006) para movimientos fuertes en campo próximo.

**b) Vulnerabilidad/escenarios sísmicos**

- Incorporación de las tipologías de “catedral” y “mercado” en el método de los índices de vulnerabilidad, así como la distinción entre los palacios mantenidos como tales y los destinados a viviendas, posiblemente más vulnerables que los anteriores. Estas modificaciones podrían dar lugar a resultados más realistas en estas tipologías.
- Mejora, en la metodología de los índices de vulnerabilidad, de los parámetros correspondientes a las tipologías distintas de las iglesias y palacios, en los que se disponía de datos insuficientes para aplicar un análisis estadístico. Además, se recomienda que, en futuros estudios, este tipo de metodologías de vulnerabilidad aporten detalles más concretos sobre las tipologías de los monumentos a partir de los cuales se han obtenido los parámetros del índice de vulnerabilidad. Datos tales como el estilo de construcción, la época o el tipo de materiales utilizado facilitarían la labor en estudios de este tipo.
- Ampliación del estudio de vulnerabilidad a otros monumentos de Málaga, permitiendo así caracterizar la vulnerabilidad de todo el patrimonio artístico y cultural de la ciudad.
- La metodología de los índices de vulnerabilidad debería aplicarse a otras ciudades españolas, comprobando así su validez en otras regiones.
- Sería conveniente realizar un estudio detallado de los daños sufridos por los monumentos y edificios históricos españoles en terremotos del pasado, lo que permitiría aplicar la metodología de los índices de vulnerabilidad teniendo en cuenta las tipologías constructivas nacionales. La generación de una base de datos con información de los edificios monumentales de nuestro país, así como su localización, tipología, daños ocasionados en el pasado, reformas realizadas, etc. (tal y como existe en Italia y Portugal), constituye una tarea esencial que debe llevarse a cabo si se pretende contribuir a la conservación de nuestro patrimonio histórico, artístico y cultural.



---

---

## *Conclusions*

---

---



The aim of this work is to analyze the seismic risk in the city of Málaga taking into account the damages suffered in the city's monuments during the 1680 earthquake. Up to the present time, vulnerability studies focused on historical buildings and monuments are still very scarce, being this work one of the first monuments' vulnerability studies in a Spanish urban environment. Though ordinary buildings' vulnerability and seismic hazard studies are essential in prevention plans, work should be done at the same time on monuments' vulnerability. As a starting point, studies should focus on those regions and urban areas affected by severe earthquakes in the past which have caused heavy damages in its historical buildings, such as the city of Málaga, in South Spain.

The main conclusions, recommendations and future work proposed are:

## **Conclusions**

### **a) Site effects**

- 1) A new microzonation has been proposed in Málaga's city centre, with six regions with different geological, topographical and geotechnical properties. Three of these regions (B1, B2 and B3), are new ones with regard to the previous microzonation in the city obtained by Clavero and Ramos (2005) and Macau (2008). These zones have the highest intensity amplifications in the city, probably because of the high shear contrasts between the soil and the rock basement. This feature can be due to the fact that they are transition regions between the rock at the surface and the sedimentary soils at the Guadalmedina river bank.
- 2) The high intensity amplifications in B1, B2 and B3 zones (of +1.0, +1.5 and +1.0, respectively), turns them into the most vulnerable regions in the city



centre. These results are consistent with the damages suffered by the monuments on the 1680 shock: B2 zone was the region with the highest percentage of monuments with damage grades 4 and 5.

- 3) A great consistency has been found in the fundamental frequencies obtained between the experimental Nakamura's technique (from microtremor measurements), and the numerical 1D method (using the nearest drills to these measurements).
- 4) There is a clear difference in the fundamental frequencies, soil amplifications and basement depths between the Eastern part of the city centre (at the hill where the Alcazaba castles lies on), and the West, near the Guadalmedina river (with sedimentary soils). The Eastern part is characterized by high soil fundamental frequencies ( $>5.0\text{Hz}$ ), low amplifications and low rock basement depths ( $<10\text{m}$ ). On the other hand, the region close to the river has soils with fundamental frequencies of around  $1.0\text{Hz}$ , higher amplifications and high basement depths (60-70m).
- 5) The generation of synthetic accelerograms using the empirical Green function or the wavenumber discretization methods is possible at low frequencies. Nevertheless, the loss of high frequencies in both methodologies has as a consequence a loss in the amplitudes, essential in the site effects studies.

## **b) Vulnerability**

- 1) The vulnerability index method proposed by Lagomarsino *et al.* (2003), has proved to be an adequate methodology for Málaga's main monuments, where a great consistency has been found between the expected and observed damages, especially for the churches typology.
- 2) There are a few monuments where discrepancy has been found between the expected and observed damages. This disagreement can be due to the difference between the buildings' typology and the ones proposed in the methodology. The most significant of these cases belong to the Cathedral and the Gibralfaro and

Alcazaba castles, which highlight the importance of adapting the monuments' typology proposed in the method to the buildings studied.

- 3) Thirteen out of the nineteen monuments studied have expected damages of 3 and 4, which correspond to heavy and very heavy damages in the EMS-98 scale. Considering the vulnerability index uncertainties, high probabilities of collapse appear for 6 out of the 19 monuments. The churches of San Juan, Santos Mártires, Capuchinos, el Carmen and Compañía de Jesús are the ones with the highest expected damages, of around grade 4.
- 4) Considering site effects is necessary to obtain good results in the monuments' vulnerability study. If the local effects are not considered, or if a simplified microzonation soft soil/rock is considered, expected damages begin to differ from observed data.
- 5) These kind of local site effects and vulnerability studies are of vital importance in preserving the historic, artistic and cultural heritage as well as in emergency planning.

#### **c) Seismic scenarios**

- 1) The deterministic scenario based on the 1680 earthquake is clearly more catastrophic than the probabilistic one based on the Spanish seismic code. The former scenario has moderate probabilities of suffering heavy or very heavy damages, or even complete destruction in some of the buildings. Nevertheless, both scenarios show significant probabilities of suffering damages. It is important to note that the maximum intensities are very high, of IX-X in the deterministic scenario, and IX in the probabilistic one.
- 2) The churches, chapel and tower studied have proved to be the most vulnerable buildings. It is highly recommended to take the necessary precautionary measures in these monuments to avoid possible damages in the future.
- 3) It must be taken into account that the monuments studied are not only buildings belonging to the city's cultural heritage, but also others such as the City Hall, the

Central Bank or the University's main building. For those buildings, good performance during an earthquake is vital in emergency planning. Considering the deterministic scenario, the most probable mean damage grades correspond to light damage for the University's main building, moderate damages to the City Hall and heavy damages to the Central Bank. These results highlight the importance of this kind of studies to avoid problems due to damages suffered by essential buildings in an emergency situation.

### **Future work**

As recommendations and future work, the following performances are proposed:

#### **a) Site effects**

- Use of alternative empirical relationships between Arias and macroseismic intensities suitable for the region of study, from strong-motion records in the area, instead of the relationship used for such a wide area as the Mediterranean region.
- Use of more sophisticated methodologies for the synthetic accelerograms generation, which include stochastic techniques to avoid the loss of high frequencies. One option could be the use of hybrid methods which combine the empirical Green function technique for low frequencies with stochastic methods for high frequencies, for example as the one proposed by Mena *et al.* (2006) for near-field strong-motion records.

#### **b) Vulnerability/seismic scenarios**

- The “cathedral” and “market” typologies could be added to the vulnerability index method in order to obtain realistic results for this kind of buildings. On the other hand, distinction should be made in the palaces between the ordinary ones and the palaces restored as apartment buildings, possibly more vulnerable.

- Improve, within the vulnerability index method, of the typologies other than churches and palaces, with a lack of enough data to make a statistical analysis. On the other hand, it is recommended that, in the future, this kind of vulnerability methodologies incorporate detailed information concerning the monuments' typologies used to obtain the vulnerability index parameters. This kind of data (building style or period, kind of materials used, etc.), could be very helpful in vulnerability studies.
- This work could be completed by studying other monuments in the city of Málaga, in order to characterize the vulnerability of the whole city's cultural, historical and artistic heritage.
- The vulnerability index methodology should be applied in other Spanish cities, in order to confirm its validity in other regions.
- It would be convenient to study in detail the damages suffered by Spanish monuments and historical buildings in past earthquakes. This study would allow us to apply the vulnerability index methodology taking into consideration national building typologies. The generation of a database with all of the Spanish monuments as well as its location, typology, past seismic damages, rebuilding processes involved, etc. (as the ones obtained in Italy or Portugal), is an essential task if we intend to preserve our historical, artistic and cultural heritage.



---

---

# *Capítulo 8*

# *Referencias*

---

---



- Andreo, B., N. Goldscheider, I. Vadillo, J.M. Vías, C. Neukum, M. Sinreich, P. Jiménez, J. Brechenmacher, F. Carrasco, H. Hötzl, M. J. Perles y F. Zwahlen (2006). Karst groundwater protection: first application of a pan-European approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Lúbar (Southern Spain). *Sci. Total Environ.* **357**, 54-73.
- Ait Brahim, L., C. Nakhcha, B. Tadili, A. El Mrabet y N. Jabour (2004). Structural analysis and interpretation of the surface deformations of the February 24th, 2004 Al Hoceima earthquake. *European-Mediterranean Seismological Centre Newsletter* **21**, 10-12.
- Aki, K. (1993). Local site effects on weak and strong ground motion, *Tectonophysics* **218**, 93-111.
- Alekseev, A.S. y B.G. Mikhailenko (1980). The solution of dynamic problems of elastic wave propagation in inhomogeneous media by a combination of partial separation of variables and finite-difference method. *J. Geophys.* **48**, 161-172.
- Álvarez, S. (1999). El efecto local sobre el movimiento sísmico del suelo: fenomenología y resultados recientes. *Física de la Tierra* **11**, 141-173. Servicio de Publicaciones de la Universidad Complutense. Madrid.
- Ambraseys, N., P. Smit, R. Berardi, D. Rinaldis, F. Cotton y C. Berge (2000). European strong-motion database. CD-ROM collection. *European Council, Environment and Climate Research Programme*.
- Andreo, B., N. Goldscheider, I. Vadillo, J.M. Vías, C. Neukum, M. Sinreich, P. Jiménez, J. Brechenmacher, F. Carrasco, H. Hötzl, M. J. Perles y F. Zwahlen (2006). Karst groundwater protection: first application of a pan-European approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Lúbar (Southern Spain). *Sci. Total Environ.* **357**, 54-73.
- Arias, A. (1970). A measure of earthquake intensity. En R.J. Hansen (editor). *Seismic design for nuclear power plants*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 438-469.



- ATC-13 (1985). Earthquake damage evaluation data for California. Applied Technology Council. California.
- Augusti, G., M. Ciampoli y P. Giovenale (2000). A procedure for the seismic reliability assessment of monumental buildings. *8<sup>th</sup> ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability*. Indiana, 24-26 julio 2000, 6 pp.
- Augusti, G., M. Ciampoli y P. Giovenale (2001). Seismic vulnerability of monumental buildings. *Struct. Saf.* **23**, 253-274.
- Augusti, G., M. Ciampoli y S. Zanobi (2002). Bounds to the probability of collapse of monumental buildings. *Struct. Saf.* **24**, 89-105.
- Ayala, F.J. (1999). Análisis sobre la evolución de la arquitectura de Málaga en los siglos XVIII y XIX. Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Málaga. Málaga, 119 pp.
- Banda, E. y A.M. Correig (1984). The Catalan earthquake of February 2, 1428. *Eng. Geol.* **20**, 89-97.
- Barbat, A.H., L.G. Pujades y N. Lantada (2006). Performance of buildings under earthquakes in Barcelona, Spain. *Comput. Aided Eng.*, **21**, 573-593.
- Barbat, A.H., L.G. Pujades y N. Lantada (2008). Seismic damage evaluation in urban areas using the capacity spectrum method: application to Barcelona. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* **28**, 851-865.
- Bard, P.Y. (1985). Les effets de site d'origine structurale: principaux résultats expérimentaux et théoriques. Victor Davidovici (editor). París, 223-271.
- Bard, P.Y. (2008). The H/V technique: capabilities and limitations based on the results of the SESAME project. *Bull. Earthquake Eng.* **6**, 1-2.
- Bard, P.Y., G. Czitrom, J.L. Durville, P. Godefroy, J.P. Meneroud, P. Mouroux y A. Pecker (1995). Guidelines for seismic microzonation studies. French Association for Earthquake Engineering, 45 pp.

- Bassin, C., G. Laske y G. Masters (2000). The current limits of resolution for surface wave tomography in North America. *EOS Trans AGU* **81**, F897.
- Belazougui, M., M.N. Farsi y A. Remas (2003). A short note on building damage. *European-Mediterranean Seismological Centre Newsletter* **20**, 7-8.
- Benedetti, D. y V. Petrini (1984). On seismic vulnerability of masonry buildings: proposal of an evaluation procedure. *L'Industria Italiana delle Costruzioni* **149**, 66-78 (en italiano).
- Benito, B. y L. Cabañas (1999). Caracterización del movimiento del suelo en ingeniería sísmica. *Física de la Tierra* **11**, 49-79. Servicio de Publicaciones de la Universidad Complutense. Madrid.
- Benito, B., R. Capote, P. Murphy, J. M. Gaspar-Escribano, J. J. Martínez-Díaz, M. Tsige, D. Stich, J. García-Mayordomo, M. J. García Rodríguez, M. E. Jiménez, J. M. Insua-Arévalo, J. A. Álvarez-Gómez y C. Canora (2007). An overview of the damaging and low magnitude  $M_w$  4.8 La Paca earthquake on 29 January 2005: context, seismotectonics, and seismic risk implications for Southeast Spain. *Bull. Seism. Soc. Am.* **97**, 671-690.
- Benito, B., J.M. Gaspar-Escribano, J. García-Mayordomo, M.E. Jiménez y M.J. García Rodríguez (2006). Proyecto RISMUR: Evaluación de la Peligrosidad Sísmica. Instituto Geográfico Nacional y Protección Civil de Murcia. Madrid, 126 pp.
- Benito, B. y M.E. Jiménez (1999). Peligrosidad sísmica. *Física de la Tierra* **11**, 13-47. Servicio de Publicaciones de la Universidad Complutense. Madrid.
- Bernardini, A. (1997). Coherence between observations and forecasts of seismic vulnerability of masonry typologies. *8<sup>th</sup> ANIDIS National Congress: Seismic Engineering in Italy*. Taormina, 177-183.
- Bernardini, A. (editor) (2000). The vulnerability of buildings: National scale evaluation of the seismic vulnerability of ordinary buildings. CNR-GNDT, Rome, 175 pp y CD-ROM (en italiano).

- Bernardini, A., S. Giovinazzi, S. Lagomarsino y S. Parodi (2007). The vulnerability assessment of current buildings by a macroseismic approach derived from the EMS-98 scale. *3<sup>er</sup> Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Gerona, 8-11 mayo 2007, 15 pp.
- Bezzeghoud, M. y E. Buforn (1999). Source parameters of the 1992 Melilla (Spain,  $M_w=4.8$ ), 1994 Alhoceima (Morocco,  $M_w=5.8$ ), and 1994 Mascara (Algeria,  $M_w=5.7$ ) earthquakes and seismotectonic implications. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **89**, 359-372.
- Bisbal, L. (1984). Estudio de la distribución de intensidades sísmicas en el ámbito valenciano. Incidencia en las obras públicas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, varios tomos.
- Bonett, R.L. (2003). Vulnerabilidad y riesgo sísmico de edificios. Aplicación a entornos urbanos en zonas de amenaza alta y moderada. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 474 pp.
- Bouchon, M. (1979). Discrete wave number representation of elastic wave fields in three-dimensions. *J. Geophys. Res.* **84**, 3609-3614.
- Bouchon, M. (1981). A simple method to calculate Green's functions for elastic layered media. *Bull. Seism. Soc. Am.* **71**, 959-971.
- Bouchon, M. (2003). A review of the discrete wavenumber method. *Pure Appl. Geophys.* **160**, 445-465.
- Bouchon, M. y K. Aki (1977). Discrete wave-number representation of seismic-source wave fields. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **67**, 259-277.
- Bour, M. y M. Cara (1997). Test of a simple empirical Green's function method on moderate-sized earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.* **87**, 668-683.
- Braga, F., M. Dolce y D. Liberatore (1982). A statistical study on damage buildings and an ensuing review of the M.S.K.-76 scale. *7<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering*. Atenas, 1982.

- Buform, E. (1994). Métodos para la determinación del mecanismo focal de los terremotos. *Física de la Tierra* **6**, 113-139. Servicio de Publicaciones de la Universidad Complutense. Madrid.
- Buform, E., B. Benito, C. Sanz de Galdeano, C. del Fresno, D. Muñoz e I. Rodríguez (2005). Study of the damaging earthquakes of 1911, 1999, and 2002 in the Murcia, Southeastern region: Seismotectonic and seismic-risk implications. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **95**, 549-567.
- Buform, E., M. Bezzeghoud, A. Udías. y C. Pro (2004). Seismic Sources on the Iberia-African Plate Boundary and their Tectonic Implications. *Pure Appl. Geophys.* **161**, 623-646.
- Buform, E., S. Cesca, T. Goded, C. del Fresno y D. Muñoz (2006). The Bullas (Murcia, SE Spain) earthquake, 29 January 2005. *J. Seism.* **10**, 65-72.
- Buform, E. y P. Coca (2002). Seismic moment tensor for intermediate depth earthquakes at regional distances in Southern Spain. *Tectonophysics* **356**, 49-63.
- Buform, E., P. Coca, A. Udías y C. Lasa (1997). Source mechanism of intermediate and deep earthquakes in southern Spain. *J. Seism.* **1**, 113-130.
- Buform, E., C. Sanz de Galdeano y A. Udías (1995). Seismotectonics of the Ibero-Maghrebian region. *Tectonophysics* **248**, 247-261.
- Buform, E., A. Udías y R. Madariaga (1991). Intermediate and deep earthquakes in Spain. *Pure Appl. Geophys.* **136**, 375-393.
- Buform, E., A. Udías y J. Martín Dávila (2007). Source mechanism of the February 12, 2007, San Vicente Cape earthquake Mw=5.9. *Orfeus Newsletter* **7**, 3 pp.
- Buform, E., A. Udías y J. Mezcua (1988). Seismicity and focal mechanisms in South Spain. *Bull. Seismol. Soc. Am.* **78**, 2008-2024.
- Cabañas, L., B. Benito y M. Herráiz (1997). An approach to the measurement of the potential structural damage of earthquake ground motions. *Earthquake Eng. Struc.* **26**, 79-92.

- Caicedo, C. (1994). Vulnerabilidad sísmica en zonas urbanas. Aplicación a un sector del Eixample de Barcelona. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Campillo, M., M. Bouchon y B. Massinon (1984). Theoretical study of the excitation, spectral characteristics, and geometrical attenuation of regional seismic phases. *Bull. Seism. Soc. Am.* **74**, 79-90.
- Candau, M., J. Díaz Pardo y F. Rodríguez Marín (2005). Malaga: guía de arquitectura. An architectural guide. Colegio de Arquitectos de Málaga. Málaga, 324 pp.
- Carbonell, R., V. Sallarés, J. Pous, J.J. Dañobeitia, P. Queralt, J.J. Ledo y V. García Dueñas (1998). A multidisciplinary geophysical study in the Betic chain (southern Iberia Peninsula). *Tectonophysics* **288**, 137-152.
- Carreño, M.L. (2006). Técnicas innovadoras para la evaluación del riesgo sísmico y su gestión en centros urbanos: Acciones ex ante y ex post. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 373 pp.
- Caselles, J.O., J.A. Canas, L. Pujades, X. Lana, J.Badal, V. Corchete y M. Navarro (1997). Improvements in the knowledge of anelastic structure of the Iberian Peninsula from seismic data of the ILIHA project. *Geophys. J. Int.* **129**, 702-714.
- Cassinello, M.J. (2007). Una olvidada lección del pasado: diseño y construcción de entramados antiguos de fábrica en zonas sísmicas. *3<sup>er</sup> Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Gerona, 8-11 mayo 2007, 14 pp.
- Castelli, V. (2006). Lest we forget. A preliminary map of the collective earthquake rituals of Italy. *1<sup>st</sup> European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. Ginebra, 3-8 septiembre 2006, 8 pp.
- CEN (2003). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. *Comité Européen de Normalisation*. CEN/TC250/SC8/N335.
- Cesca, S. (2005). Inversión del tensor momento sísmico de terremotos superficiales a distancias regionales. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, 289 pp.

- Chatelain, J.L., B. Guillier, F. Cara, A.M. Duval, K. Atakan, P.Y. Bard and the WP02 SESAME team (2008). Evaluation of the influence of experimental conditions on H/V results from ambient noise recordings. *Bull. Earthquake Eng.* **6**, 33-74.
- Chávez Morillo, J. (1998). Evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo sísmico a escala regional: aplicación a Cataluña. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 343 pp.
- Cid, J. (1998). Zonación sísmica de la ciudad de Barcelona basada en métodos de simulación numérica de efectos locales. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 215 pp.
- Cid, J., T. Susagna, X. Goula, L. Chavarria, S. Figueras, J. Fleta, A. Casas y A. Roca (2001). Seismic zonation of Barcelona based on numerical simulation of site effects. *Pure Appl. Geophys.* **158**, 2559-2577.
- Clavero, D. (2006). Riesgos geológicos y geotécnicos en el término municipal de Málaga (microzonación sísmica). *5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. Sevilla, 30 enero-3 febrero 2006, 4 pp.
- Clavero, D. (2007). Microzonación sísmica del término municipal de Málaga, basada en el coeficiente del terreno C. *3<sup>er</sup> Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Gerona, 8-11 mayo 2007, 10 pp.
- Clavero, D. y L. Ramos, (2005). Riesgos geológicos y geotécnicos en el término municipal de Málaga. LIDYCCE, 42 pp.
- Coral, H. (2002). Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de zonas urbanizadas en Andorra. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 207 pp.
- Cormier, V.F. (1980). The synthesis of complete seismograms in an earth model specified by radially inhomogeneous layers. *Bull. Seism. Soc. Am.* **70**, 691-716.
- Corsanego, A. y V. Petrini (1994). Evaluation of criteria of seismic vulnerability of the existing building patrimony on the national territory. *Seismic Engineering* **1**, 16-24.

- Dañobeitia, J.J., V. Sallarès y J. Gallart (1998). Local earthquakes seismic tomography in the Betic Cordillera (southern Spain). *Earth Planet. Sci. Lett.* **160**, 225-239.
- Delgado, J., C. López Casado, A. Estévez, J. Giner, A. Cuenca y S. Molina (2000). Mapping soft soils in the Segura river valley (SE Spain): a case study of microtremors as an exploration tool. *J. Appl. Geophys.* **45**, 19-32.
- Dimitriu, P.P., C. A. Papaioannou y N.P. Theodulidis (1998). EURO-SEISTEST strong-motion array near Thessaloniki, Northern Greece: a study of site effects. *Bull. Seism. Soc. Am.* **88**, 862-873.
- Dirección General de Protección Civil (1995). Directriz básica de planificación de Protección Civil ante el riesgo sísmico. Imprenta Nacional del Boletín Oficial del Estado. Madrid, 20 pp.
- Dolce, M. (1997). Evaluation of vulnerability for risk analysis and damage scenarios. 8<sup>th</sup> ANIDIS National Congress: Seismic Engineering in Italy. Taormina, 217-226.
- Dolce, M., G. Zuccaro, A. Kappos y A. Coburn (1994). Report of the EAEE working group 3: Vulnerability and risk analysis. 10<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering **4**. Viena, 3049-3077.
- Dziewonski, A.M. y D.L. Anderson (1981). Preliminary reference Earth model. *Phys. Earth. Planet. Int.* **25**, 297-356.
- Estévez González, C. y C. Chamón C. (1978). Mapa geológico y memoria explicativa de la hoja 1053 (Málaga-Torremolinos) a escala 1:50.000 del Mapa Geológico Nacional IGME, 32pp.
- Fäh, D. (2006). Evaluating site effects in areas of low seismicity. 1<sup>st</sup> European Conference on Earthquake Engineering and Seismology. Ginebra, 3-8 septiembre 2006, 15 pp.
- Frankel, A., J. Fletcher, F. Vernon, L. Haar, J. Berger, T. Hanks y J. Brune (1986). Rupture characteristics and tomographic source imaging of  $M_L \approx 3$  earthquakes near Anza, Southern California. *J. Geophys. Res.* **91**, 12633-12650.

- Frankel, A. y H. Kanamori (1983). Determination of rupture duration and stress drop from earthquakes in Southern California. *Bull. Seism. Soc. Am.* **73**, 1527-1551.
- Freeman, S.A. (1998). The Capacity Spectrum method. *11<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering*. París.
- Fresno, C. del (2004). Sismotectónica de regiones activas: terremotos de profundidad intermedia en el sur de España. Trabajo de Investigación. Universidad Complutense de Madrid, 104 pp.
- Fullea, J., M. Fernàndez, H. Zeyen y J. Vergés (2007). A rapid method to map the crustal and lithospheric thickness using elevation, geoid anomaly and thermal analysis. Application to the Gibraltar Arc System, Atlas Mountains and adjacent zones. *Tectonophysics* **430**, 97-117.
- Gallart, J., J. Díaz, N. Vidal y J.J. Dañobeitia (1995). The base of the crust at the Betics-Alboran Sea transition: evidence for an abrupt structural variation from wide-angle ESCI data. *Rev. Soc. Geol. España* **8**, 519-527.
- García González, E., S. Jiménez Montoya, A. Mesa, J.M. Torcello y U. Verdugo (1987). Plano-guía de la arquitectura malagueña. El centro. Colegio de Arquitectos en Málaga. Málaga, 87 pp.
- García-Mayordomo, J., J. M. Gaspar-Escribano y B. Benito (2007). Seismic hazard assessment of the province of Murcia (SE Spain): analysis of source contribution to hazard. *J. Seismol.* **11**, 453-471.
- Gaspar-Escribano, J.M. y B. Benito (2007). Ground-motion characterization of low-to-moderate seismicity zones and implications for seismic design: lessons from recent  $M_w \approx 4.8$  damaging earthquakes in Southeast Spain. *Bull. Seism. Soc. Am.* **97**, 531-544.
- Gaspar-Escribano, J.M., B. Benito y J. García-Mayordomo (2008). Hazard-consistent response spectra in the region of Murcia (Southeast Spain): comparison to earthquake-resistant provisions. *Bull. Earthquake Eng.* **6**, 179-196.



- Giovinazzi, S. (2005). The vulnerability assessment and the damage scenario in seismic risk analysis. Tesis Doctoral. Technical University Carolo-Wilhelmina, Braunschweig (Germany), and University of Florence, 210 pp.
- Giovinazzi, S. y S. Lagomarsino (2002). A methodology for the vulnerability analysis of built-up areas. *International Conference on Earthquake Loss Estimation and Risk Reduction*, Bucharest.
- Goded, T. (2006). Reevaluación de daños de los terremotos de Málaga de 1494 y 1680. Trabajo de Investigación. Universidad Complutense de Madrid, 152 pp.
- Goded, T., E. Bufo, D. Muñoz, J. Irizarry y J. Martín Dávila (2007). Estudio preliminar de la vulnerabilidad de los monumentos de la ciudad de Málaga. *3<sup>er</sup> Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Gerona, 8-11 Mayo 2007, 11 pp.
- Goded, T., E. Bufo y D. Muñoz (2008a). The 1494 and 1680 Málaga (Southern Spain) earthquakes. *Seism. Res. Lett.* **79**, 707-715.
- Goded, T., E. Bufo y L. Rivera (2008b). Generación de sismogramas teóricos: aplicación a terremotos del sur de España. *6<sup>a</sup> Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. Tomar (Portugal), 11-14 febrero 2008, 307-308.
- Goded, T., D. Muñoz y E. Bufo (2006). Reevaluación de los daños de los terremotos de Málaga de 1494 y 1680. *5<sup>a</sup> Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. Sevilla, 30 enero-3 febrero 2006, 3 pp.
- González de Vallejo, L.I., M. Ferrer, L. Ortuño y C. Oteo (2006). Ingeniería geológica. Editorial Prentice Hall, 715 pp.
- Goula, X., T. Susagna, S. Figueras, J. Cid, A. Alfaro y A. Barchiesi (1998). Comparison of numerical simulation and microtremor measurement for the analysis of site effects in the city of Barcelona (Spain). *11<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering*. París, 13 pp.
- Gràcia, E., R. Pallàs, J.I. Soto, M. Comas, X. Moreno, E. Masana, P. Santanach, S. Díez, M. García y J. Dañobeitia (2006). Active faulting offshore SE Spain

- (Alboran Sea): Implications for earthquake hazard assessment in the Southern Iberian Margin. *Earth Planet. Sc. Lett.* **241**, 734-749.
- Grünthal, G. (editor) (1998). European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98). *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie* **15**. Luxembourg, 99 pp.
- Guéguen, P., C. Michel y L. LeCorre (2007). A simplified approach for vulnerability assessment in moderate-to-low seismic hazard regions: application to Grenoble (France). *Bull. Earthquake Eng.* **5**, 467-490.
- Ha, J. (1984). Recurrence relations for computing complete P and SV seismograms. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* **79**, 863-873.
- Haghshenas, E., P.Y. Bard, N. Theodulidis and the SESAME WP04 team (2008). Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio. *Bull. Earthquake Eng.* **6**, 75-108.
- Hamilton, E. (1971). Elastic properties of marine sediments. *J. Geophys. Res.* **76**, 579-604.
- Hartzell, S.H. (1978). Earthquake aftershocks as Green's functions. *Geophys. Res. Lett.* **5**, 1-4.
- Hartzfeld, D. (1978). Étude sismotectonique de la zone de collision Ibero-Maghrebien. Tesis Doctoral. Université de Montpellier, 282 pp.
- Hartzfeld, D. y M. Frogneux (1978). Intermediate depth seismicity in the western Mediterranean unrelated to subduction of oceanic lithosphere. *Nature* **292**, 443-445.
- HAZUS99 SR2 (1999). Technical manual. Federal Emergency Management Administration. National Institute of Building Sciences. Página web: <http://www.fema.gov/plan/prevent/hazus>
- Herrmann, R.B. (editor) (2002). Computer programs in Seismology. An overview of synthetic seismogram computation. Version 3.30, 181 pp.

- Herrmann, R.B. y B. Mandal (1986). A study of wavenumber integration techniques. *Earthquake Notes* **57**, 33-40.
- Herrmann, R.B. y C.Y. Wang (1985). A comparison of synthetic seismograms. *Bull. Seism. Soc. Am.* **75**, 41-56.
- Ibs-von Seht, M. y J. Wohlenberg (1999). Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. *Bull. Seism. Soc. Am.* **89**, 250-259.
- IGN (A). Instituto Geográfico Nacional. Terremotos más importantes ocurridos en España. [http://www.fomento.es/MFOM/LANG\\_CASTELLANO/DIRECCIONES\\_GENERALES/INSTITUTO\\_GEOGRAFICO/Geofisica/sismologia/informacion\\_sis/1884.htm](http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Geofisica/sismologia/informacion_sis/1884.htm).
- IGN (B). Instituto Geográfico Nacional. Catálogo de tsunamis en las costas españolas. [http://www.fomento.es/MFOM/LANG\\_CASTELLANO/DIRECCIONES\\_GENERALES/INSTITUTO\\_GEOGRAFICO/Geofisica/sismologia/informacion\\_sis/cats\\_um.htm](http://www.fomento.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/INSTITUTO_GEOGRAFICO/Geofisica/sismologia/informacion_sis/cats_um.htm).
- Ingate, S.F., G. Bock y R. Kind (1983). Synthesis of complete SH seismograms. *Geophys. J. R. Astron. Soc.* **75**, 261-274.
- Irikura, K. (1983). Semi-empirical estimation of strong ground motions during large earthquakes. *Bull. Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.* **33**, 63-104.
- Irikura, K. y K. Kamae (1994). Estimation of strong ground motion in broad-frequency band based on a seismic source scaling model and an empirical Green's function technique. *Ann. Geofis.* **37**, 1721-1743.
- Irizarry, J. (2004). An advanced approach to seismic risk assessment. Application to the cultural heritage and the urban system of Barcelona. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 406 pp.
- Irizarry, J., A. Macau, T. Goded, D. Clavero, A. Pazos, S. Figueras, R. García and ERSE Working Group (2006). Preliminary seismic risk scenarios for Malaga, Spain. *8<sup>th</sup> U.S. National Conference on Earthquake Engineering*. San Francisco, 18-22 abril 2006, 10 pp.

- Irizarry, J., A. Macau, T. Susagna, R. García, S. Figueras, T. Goded, D. Clavero y A. Pazos (2007). Escenarios de riesgo sísmico para la ciudad de Málaga. *3<sup>er</sup> Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Gerona, 8-11 mayo 2007, 18 pp.
- Jiménez, M.J., M. García-Fernández, G. Zonno y F. Cella (2000). Mapping soil effects in Barcelona, Spain, through an integrated GIS environment. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* **19**, 289-301.
- Kamae, K., P.Y. Bard y K. Irikura (1998). Prediction of strong ground motion at EURO-SEISTEST site using the empirical Green's function method. *J. Seism.* **2**, 193-207.
- Kanamori, H. (1979). A semi-empirical approach to prediction of long-period ground motions from great earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.* **69**, 1645-1670.
- Kennett, B.L.N. y E.R. Engdahl (1991). Travel times for global earthquake location and phase identification. *Geophys. J. Int.* **105**, 429-465.
- Kind, R. (1978). The reflectivity method for a buried source. *J. Geophys.* **44**, 603-612.
- Kraeva, N. (2004). Tikhonov's regularization for deconvolution in the empirical Green function method and vertical directivity effect. *Tectonophysics* **383**, 29-44.
- Lachet, C. y P.Y. Bard (1994). Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique. *J. Phys. Earth.* **42**, 377-397.
- Lagomarsino, S. (1998). A new methodology for the post-earthquake investigation of ancient churches. *11<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering*. París, 1998, 12pp.
- Lagomarsino, S. (2006). On the vulnerability assessment of monumental buildings. *Bull. Earthquake Eng.* **4**, 445-463.
- Lagomarsino, S. (2007). Mechanical models for the vulnerability assessment of current buildings. *3<sup>er</sup> Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Gerona, 8-11 mayo 2007, 19 pp.

- Lagomarsino, S., S. Giovinazzi, S. Podestà y S. Resemini (2003). RISK-UE. An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns. WP5: Vulnerability assessment of historical and monumental buildings. DISEG, University of Genoa, Italy, 90 pp.
- Lagomarsino, S. y S. Podestà (2004a). Seismic vulnerability of ancient churches: I. Damage assessment and emergency planning. *Earthquake Spectra* **20**, 377-394.
- Lagomarsino, S. y S. Podestà (2004b). Seismic vulnerability of ancient churches: II. Statistical analysis of surveyed data and methods for risk analysis. *Earthquake Spectra* **20**, 395-412.
- Lagomarsino, S. y S. Podestà (2004c). Damage and vulnerability assessment of churches after the 2002 Molise, Italy, earthquake. *Earthquake Spectra* **20**, S271-S283.
- Lagomarsino, S., S. Podestà y S. Resemini (2004). Observational and mechanical models for the vulnerability assessment of monumental buildings. *13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver. 1-6 agosto 2004, 15 pp.
- Lagomarsino, S. y S. Resemini (2009). The assessment of damage limitation state in the seismic analysis of monumental buildings. *Earthquake Spectra* **25**, 323-346.
- Lantada, N. (2007). Evaluación del riesgo sísmico mediante métodos avanzados y técnicas GIS. Aplicación a la ciudad de Barcelona. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 349 pp.
- Lantada, N., J. Irizarry, A.H. Barbat, X. Goula, A. Roca, T. Susagna y L.G. Pujades (2009). Seismic hazard and risk scenarios for Barcelona, Spain, using the Risk-UE vulnerability index method. *Bull. Earthquake Eng.* doi: 10.1007/s10518-009-9148-z, 29 pp.
- Lantada, N., L.G. Pujades y A.H. Barbat (2008). Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison. *Nat. Hazards*. doi: 10.1007/s11069-007-9212-4, 24 pp.

- Le Brun, B., D. Hatzfeld y P.Y. Bard (2001). Site effect study in urban area: experimental results in Grenoble (France). *Pure Appl. Geophys.* **158**, 2543-2557.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. *Bull. Seism. Soc. Am.* **83**, 1574-1594.
- Lermo, J. y F.J. Chávez-García (1994). Are microtremors useful in site response evaluation? *Bull. Seism. Soc. Am.* **84**, 1350-1364.
- LIDYCCE (Laboratorio del Instituto de Investigación, Desarrollo y Control de Calidad en la Edificación) (2005). Base de datos geotécnicos de la ciudad de Málaga.
- López Arroyo, A. y A. Udías (1972). Aftershock sequence and focal parameters of the February 28, 1969 earthquake of the Azores-Gibraltar fracture zone. *Bull. Seism. Soc. Am.* **62**, 699-720.
- López Arroyo, A. y J. Villacañas (1999). Metodología simplificada para el análisis del riesgo sísmico. *Física de la Tierra* **11**, 269-284. Servicio de Publicaciones de la Universidad Complutense. Madrid.
- Luzón, F., V. J. Palencia, J. Morales, F. J. Sánchez-Sesma y J. M. García (2002). Evaluation of site effects in sedimentary basins. *Física de la Tierra* **14**, 183-214. Servicio de Publicaciones de la Universidad Complutense. Madrid.
- Macau, A. (2005). Aplicació de mètodes experimentals i de simulació numèrica per a la microzonació sísmica en zones rurals i urbanes. Trabajo de Investigación. Universitat Politècnica de Catalunya, 62 pp.
- Macau, A. (2008). Microzonación sísmica. Contribución a los estudios de peligrosidad sísmica a escala local en zonas rurales y urbanas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 328 pp.
- Macau, A., S. Figueras, D. Clavero, T. Goded, A. de Paz y A. Pazos (2006). Estudio de los efectos de suelo en la ciudad de Málaga. *5ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. Sevilla, 30 enero-3 febrero 2006, 4 pp.
- Martín Martín, A.J. (1984). Riesgo sísmico en la Península Ibérica. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2 tomos.

- Martínez Ruiz, G. (2008). Vulnerabilidad sísmica para edificios históricos de obra de fábrica de mediana y gran luz. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Martínez Solares, J.M. (2001). Los efectos en España del terremoto de Lisboa (1 noviembre de 1755). Instituto Geográfico Nacional. Monografía 19. Madrid, 756 pp.
- Martínez Solares, J.M. y A. López Arroyo (2004). The great historical 1755 earthquake. Effects and damage in Spain. *J. Seism.* **8**, 275-294.
- Martínez Solares, J.M. y J. Mezcua (2002). Catálogo sísmico de la Península Ibérica (880 a.C.-1900). Monografía nº18. Instituto Geográfico Nacional. Madrid, 253 pp.
- MCEER (2009). Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research. L'Aquila Italy Earthquake: Preliminary Damage Reports. Página web: <http://mceer.buffalo.edu/research/Reconnaissance/LAquila4-06-09/default.asp>
- Mena, B., E. Durukal y M. Erdik (2006). Effectiveness of hybrid Green's function method in the simulation of near-field strong motion: an application to the 2004 Parkfield earthquake. *Bull. Seism. Soc. Am.* **96**, S183-S205.
- Mena, U. (2002). Evaluación del riesgo sísmico en zonas urbanas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 240 pp.
- Mezcua, J. y J.M. Martínez Solares (1983). Sismicidad en el área Ibero-Magrebí. Instituto Geográfico Nacional. Publicación 203, 299 pp.
- Morales, J., I. Serrano, A. Jabaloy, J. Galindo-Zaldivar, D. Zhao, F. Torcal, F. Vidal y F. Gonzalez-Lodeiro (1999). Active continental subduction beneath the Betic Cordillera and the Alboran Sea. *Geology* **27**, 735-738.
- Mori, J. y A. Frankel (1990). Source parameters for small events associated with the 1986 North Palm Springs, California, earthquake determined using empirical Green functions. *Bull. Seism. Soc. Am.* **80**, 278-295.
- Mouroux, P. y B. Le Brun (2006). Presentation of RISK-UE project. *Bull. Earthquake Eng.* **4**, 323-339.

- Mueller, C.S. (1985). Source pulse enhancement by deconvolution of an empirical Green's function. *Geophys. Res. Lett.* **12**, 33-36.
- Munuera, J.M. (1963). Datos básicos para un estudio de sismicidad en la región de la Península Ibérica. *Mem. Inst. Geog. Cat.* **32**. Madrid, 93 pp.
- Muñoz, D. (1983). Estudio del riesgo sísmico en el sur y sureste de la península Ibérica. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, 117 pp.
- Muñoz, D. (1989). Conceptos básicos en riesgo sísmico. *Física de la Tierra* **1**, 199-215. Servicio de Publicaciones de la Universidad Complutense. Madrid.
- Muñoz, D. y A. Udías (1981). Estudio de los parámetros y serie de réplicas del terremoto de Andalucía del 25 de diciembre de 1884, y de la sismicidad de la región de Granada-Málaga. En "El terremoto de Andalucía de 1884". Presidencia del Gobierno. Instituto Geográfico Nacional. Madrid, 95-125.
- Muñoz, D. y A. Udías (1988). Evaluation of damage and source parameters of the Málaga earthquake of 9 October 1680. *Historical Seismograms and Earthquakes of the World*. Academic Press. Editado por W.H.K. Lee, H. Meyers y K. Shimazaki, 208-221.
- Muñoz, D., A. Udías y E. Moreno (1983). Reevaluación de los daños del terremoto de 1829 (Torre Vieja). En "Sismicidad histórica de la región de la Península Ibérica". *Asoc. Esp. de Ing. Sísmica*, 38-41.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute* **30**, 25-33.
- Nakamura, Y. (2000). Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. *12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland (New Zealand), 8 pp.
- Navarro, M., F.J. Alcalá-García, F. Vidal, T. Enomoto, N. Abeki y F.J. Sánchez (2002). Evaluation of site effects in Adra town (Southern Spain). *Física de la Tierra* **14**, 215-228. Servicio de Publicaciones de la Universidad Complutense. Madrid.



- Navarro, M., J.A. García-Jerez, F.J. Alcalá, F. Vidal, T. Enomoto, F. Luzón y C. Creus (2008).  $V_s^{30}$  structure of Lorca town (SE Spain) from ambient noise array observations. *31<sup>st</sup> European Seismological Commission*. Creta, 7-12 septiembre 2008, 288-295.
- Navarro, M., F. Vidal, T. Enomoto, F. J. Alcalá, A. García-Jerez, F.J. Sánchez y N. Abeki (2007). Analysis of the weightiness of site effects on reinforced concrete (RC) building seismic behaviour: the Adra town example (SE Spain). *Earthquake Eng. Struc.* **36**, 1363-1383.
- NCSE-02 (2002). Norma de Construcción Sismorresistente Española. Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes. Real Decreto 997/2002. *Boletín Oficial del Estado* **244**, 35898-35967.
- Nogoshi, M. y T. Igarashi (1971a). On the propagation characteristics of microtremors. *J. Seismol. Soc. Japan* **23**, 264-280.
- Nogoshi, M. y T. Igarashi (1971b). On the amplitude characteristics of ambient noise (part 2). *J. Seismol. Soc. Japan* **24**, 26-40 (en japonés).
- Pavic, R., M.G. Koller, P.Y. Bard y C. Lacave-Lachet (2000). Ground motion prediction with the empirical Green's function technique: an assessment of uncertainties and confidence level. *J. Seism.* **4**, 59-77.
- Pedrerá, A., J. Galindo-Zaldívar, A. Ruíz-Constán, C. Duque, C. Marín-Lechado e I. Serrano (2009). Recent large fold nucleation in the upper crust: Insight from gravity, magnetic, magnetotelluric and seismic data (Sierra de Los Filabres-Sierra de Las Estancias, Internal Zones, Betic Cordillera). *Tectonophysics* **463**, 145-160.
- Pérez-Ruiz, J.A., A. Posadas, N. Lantada y L.G. Pujades (2007). Métodos avanzados de generación de escenarios de riesgo sísmico. Aplicación a la ciudad de Motril (España). *3<sup>er</sup> Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Gerona, 8-11 mayo 2007, 15 pp.
- ProShake (2000). User's Manual. Ground Response Analysis Program. Version 1.1. EduPro Civil Systems, Inc. Redmond, Washington, 54 pp.

- Pujades, L. G., J. A. Canas, J. J. Egozcue, M. A. Puigví, J. Gallart, X. Lana, J. Pous y A. Casas (1990). Coda-Q distribution in the Iberian Peninsula. *Geophys. J. Int.* **100**, 285-301.
- RADIUS (1999). Risk Assessment Tools for Diagnosis of Urban Areas Against Seismic Disasters. United Nations initiative towards Earthquake Safe Cities. Página web: <http://www.geohaz.org/contents/projects/radius.html>
- Ramírez Rayo, M.S., A. Castañón, J. Plaza y B. Benito (coordinadores) (2008). Proyecto Expel. Sistema experto de análisis probabilista de la peligrosidad sísmica. Consejo de Seguridad Nuclear. Colección Documentos I+D 16.2008, 296 pp.
- Reicherter, K.R. y G. Peters (2005). Neotectonic evolution of the Central Betic Cordilleras (Southern Spain). *Tectonophysics* **405**, 191-212.
- Roca, A., X. Goula, T. Susagna, J. Chávez, M. González y E. Reinoso (2006). A simplified method for vulnerability assessment of dwelling buildings and estimation of damage scenarios in Catalonia, Spain. *Bull. Earthquake Eng.* **4**, 141-158.
- Rodríguez de la Torre, F. (1984). Los terremotos alicantinos de 1829. Instituto de Estudios Alicantinos. Excma. Diputación Provincial de Alicante. Alicante. Serie I, nº 100, 323 pp.
- Rodríguez Marín, F. (2000). Málaga conventual. Estudio histórico, artístico y urbanístico de los conventos malagueños. Obra Social y Cultural CajaSur. Málaga, 411 pp.
- Roumelioti, Z., C. Benetatos, A. Kiratzi, G. Stavrakakis y N. Melis (2004). A study of the 2 December 2002 (M5.5) Vartholomio (western Peloponnese, Greece) earthquake and of its largest aftershocks. *Tectonophysics* **387**, 65-79.
- Roumelioti, Z., D. Dreger, A. Kiratzi y N. Theodoulidis (2003). Slip distribution of the 7 September 1999 Athens earthquake inferred from an empirical Green's function study. *Bull. Seism. Soc. Am.* **93**, 775-782.

- Safina, S. (2003). Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales. Análisis de su contribución al riesgo sísmico. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña, 250 pp.
- Sánchez Dulcet, F. (2003). Ingeniería sísmica: estudio de la respuesta sísmica en emplazamientos de la Vega Baja del río Segura. Trabajo de Investigación. Universidad Complutense de Madrid, 124 pp.
- Sandi H. y I. Floricel (1994). Analysis of seismic risk affecting the existing building stock. *10<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering* **2**. Viena, 1105-1110.
- Schnabel, P.B., J. Lysmer y H.B. Seed (1972). SHAKE: a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Earthquake Engineering Research Center. University of California. Berkeley, report nº EERC 72-12, 88 pp.
- Seber, D., M. Barazagi, A. Iberbrahim y A. Demnati (1996). Geophysical evidence for lithospheric delamination beneath the Alboran Sea and Rift-Betic mountains. *Nature* **379**, 785-790.
- Serrano, F. y A. Guerra (2005). Geología de la provincia de Málaga. Diputación Provincial de Málaga. Málaga, 294 pp.
- Serrano, I., J. Morales, D. Zhao, F. Torcal y F. Vidal (1998). P-wave tomographic images in Central Betics-Alboran sea (South Spain) using local earthquakes: contribution for a continental collision. *Geophys. Res. Lett.* **25**, 4031-4034.
- Singh, S.K., E. Mena y R. Castro (1988). Some aspects of source characteristics of the 9 September 1985 Michoacan earthquake and ground motion amplification in and near Mexico city from strong motion data. *Bull. Seism. Soc. Am.* **78**, 451-477.
- Singh, S.K., J. Pacheco, M. Ordaz y V. Kostoglodov (2000). Source time function and duration of Mexican earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.* **90**, 468-482.
- Sousa, C. (2003). Seismic vulnerability of historical constructions: a contribution. *Bull. Earthquake Eng.* **1**, 37-82.

- Spence, R. (2007). Saving lives in earthquakes: successes and failures in seismic protection since 1960. *Bull. Earthquake Eng.* **5**, 139-251.
- Spence, R.S., F. Papa, C.S. Oliveira, D.F. D'Ayala y G. Zuccaro (2000). The performance of strengthened masonry buildings in recent European earthquakes. *12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*. Nueva Zelanda, paper 1366.
- Sponheuer, W. (1960). Methoden zur herdtirefenbestimmung in der makroseismic. *Freiberger Forschungshefte* **C88**, 117 pp.
- Stich, D., E. Serpelloni, F. Mancilla y J. Morales (2006). Kinematics of the Iberia-Maghreb plate contact from seismic moment tensors and GPS observations. *Tectonophysics* **426**, 295-317.
- Suzuki, T. (1933). Amplitude of Rayleigh on the surface of a stratified medium. *B. Earthq. Res. I. Tokyo* **11**, 187-194.
- Tapia, M., A. Macau, S. Figueras y P. Franek (2006). 1D and 2D seismic wave propagation modeling in the Cerdanya valley (Catalonia, Spain). *3<sup>rd</sup> International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion*. Grenoble, 30 agosto-1 septiembre 2006, 10 pp.
- Tapley, C.T. y J.E. Tull (1992). SAC: Seismic Analysis Code. User Manual.
- Theodoulidis, N., G. Cultrera, V. De Rubeis, F. Cara, A. Panou, M. Pagani y P. Teves-Costa (2008). Correlation between damage distribution and ambient noise H/V spectral ratio: the SESAME project results. *Bull. Earthquake Eng.* **6**, 109-140.
- Torne, M., M. Fernández, M.C. Comas y J.I. Soto (2000). Litospheric structure beneath the Alboran Basin: Results from 3D gravity modeling and tectonic relevance. *J. Geophys. Res.* **105**, 3209-3228.
- Torres-Vera, M.A. y J.A. Canas (2003). A lifeline vulnerability study in Barcelona, Spain. *Reliab. Eng. Syst. Safe.* **80**, 205-210.
- Udías, A. y A. López Arroyo (1969). Body and surface wave study of source parameters of the March 15, 1964 Spanish earthquake. *Tectonophysics* **9**, 323-346.

Wang, C.Y. y R.B. Herrmann (1980). A numerical study of P-, SV- and SH-wave generation in a plane layered medium. *Bull. Seism. Soc. Am.* **70**, 1015-1036.

Yelles-Chaouche, A.K., H. Djellit y M. Hamdache (2003). The Boumerdes -Algiers (Algeria) Earthquake of May 21st, 2003 (Mw=6.8). *European-Mediterranean Seismological Centre Newsletter* **20**, 3-5.

---

---

# *ANEXOS*

---

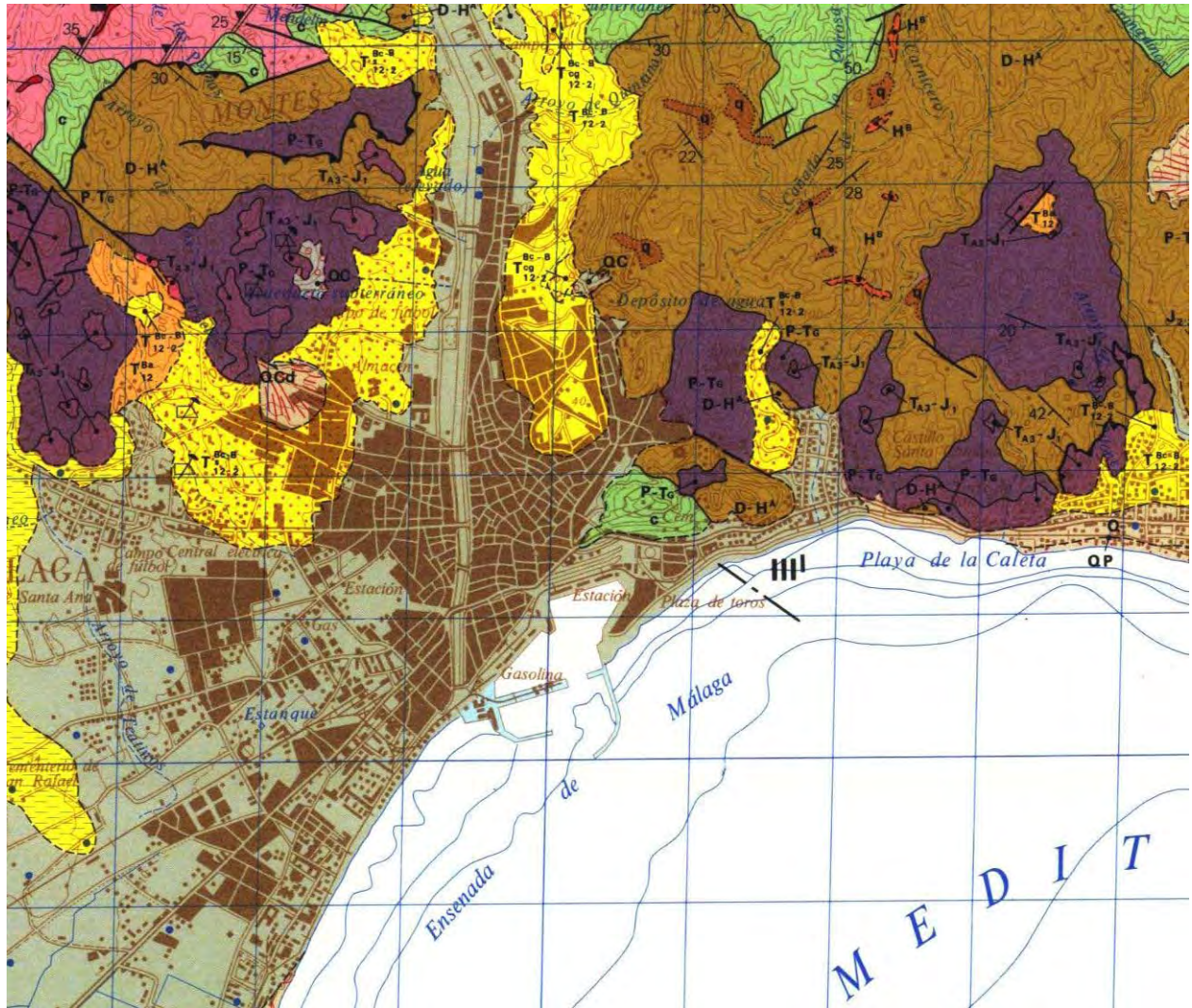
---



## **Anexo I. Geología de la ciudad de Málaga**

Mapa geológico de la ciudad de Málaga a escala 1:50.000, así como la leyenda del mismo. Se ha realizado una ampliación de la zona centro de la ciudad correspondiente a este estudio.





Mapa geológico de la ciudad de Málaga a escala 1:50.000. Ampliación de la zona centro (Estévez y Chamón, 1978).

### SEDIMENTOS POST-MANTOS

CUATERNARIO	SUPERIOR	Q	Indiferenciado
		Q.P	Playas
		Q.Ai	Aluvial
PLIOCENO	ANDALUCIENSE	Q.D	Dunas
		Q.P.	Arenisca y conglomerados
		Q.C	Coluviones
MIOCENO	BURDIGALIENSE	Q.Cd	Conos
		Q.tr	Tobas
		T <sub>1,2</sub> <sup>1,2</sup> - Q <sub>1</sub>	Piedemontes sin costras calcáreas
		T <sub>1,2</sub> <sup>1,2</sup> - Q <sub>1</sub> , K	Piedemontes con costras calcáreas
		T <sub>1,2</sub> <sup>1,2</sup> - H <sub>1,2</sub>	Indiferenciado: Arenas y arcillas
		T <sub>1,2</sub> <sup>1,2</sup> - H <sub>1,2</sub>	Conglomerados
		T <sub>1,2</sub> <sup>1,2</sup> - H <sub>1,2</sub>	Arenas
		T <sub>1,2</sub> <sup>1,2</sup> - H <sub>1,2</sub>	Arcillas y/o Margas
		T <sub>1,2</sub> <sup>1,2</sup> - H <sub>1,2</sub>	Areniscas y conglomerados

### MALAGUIDE

EOCENO INFERIOR	T <sub>1,2</sub> <sup>1,2</sup>	T <sub>1,2</sub> <sup>1,2</sup>	Calizas y margas
CRETACICO SUPERIOR	C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>	Calizas rojas
JURASICO	MALM	J <sub>2,3</sub>	Calizas blancas
	DOGGER	T <sub>4,5</sub> -J <sub>1</sub>	Dolomías
	LIAS	P-T <sub>2</sub>	Areniscas, conglomerados, yesos y arcillas
TRIASICO		H <sup>1</sup>	Conglomerado poligénico
PERMICO		q	Lilitas
CARBONIFERO		D-H <sup>1</sup>	Grauwacas y filitas
DEVONICO		S-D	Calizas, filitas y grauwacas
SILURICO		c	Calizas
ORDOVICICO-CAMBRICO		cg	Conglomerados silíceos
PRECAMBR		PC-S <sup>1</sup> f	Filitas y metaareniscas

### UNIDAD DE BENAMOCARRA

PALEOZOICO	PC-PE <sub>1</sub>	PC-PE <sub>1</sub>	Micasquistos con granate, andalucita y estaurolita
PRECAMBRICO			

### ALPUJARRIDE

PERMICO-TRIAS INFERIOR?	P-T <sub>1</sub> -E <sub>1</sub>	P-T <sub>1</sub> -E <sub>1</sub>	Esquistos y cuarcitas
-------------------------	----------------------------------	----------------------------------	-----------------------

### UNIDAD DE BLANCA

TRIASICO?	T <sub>1</sub> -Δ-E <sub>1</sub> A	T <sub>1</sub> -Δ-E <sub>1</sub> A	Mármol azul tableado
-----------	------------------------------------	------------------------------------	----------------------

### ROCAS FILONIANAS

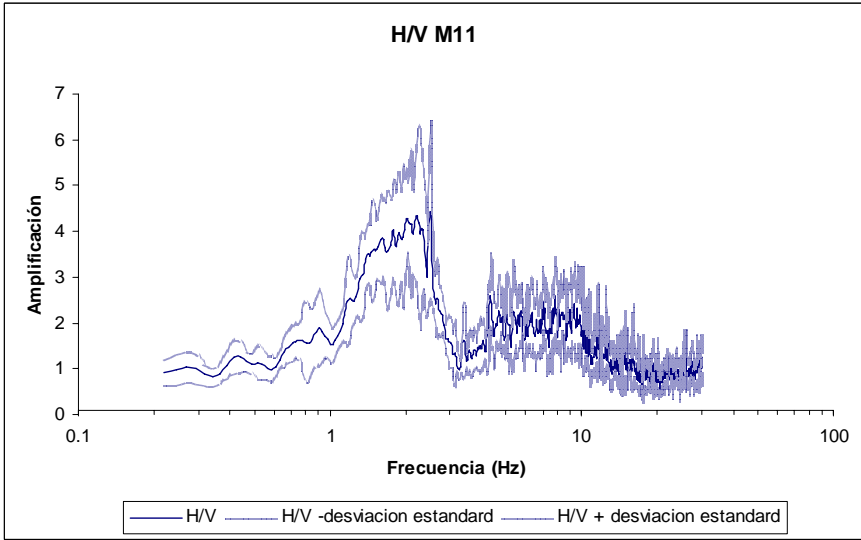
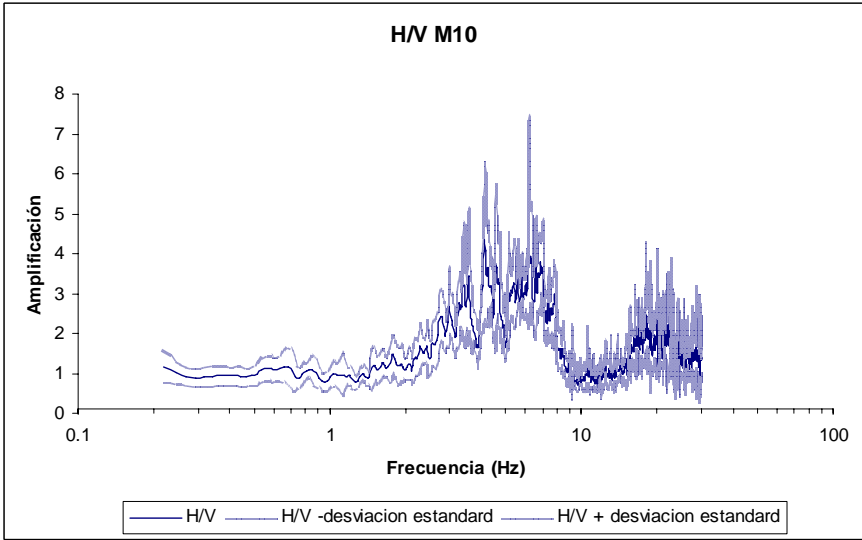
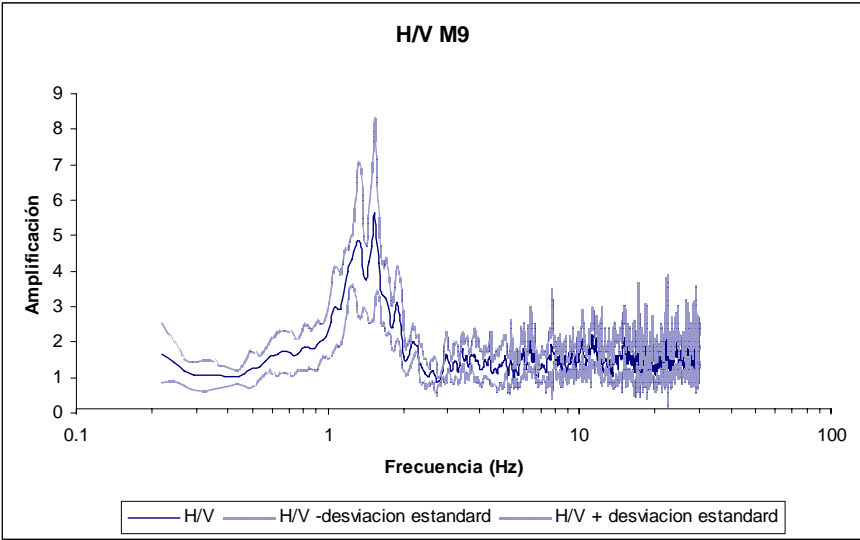
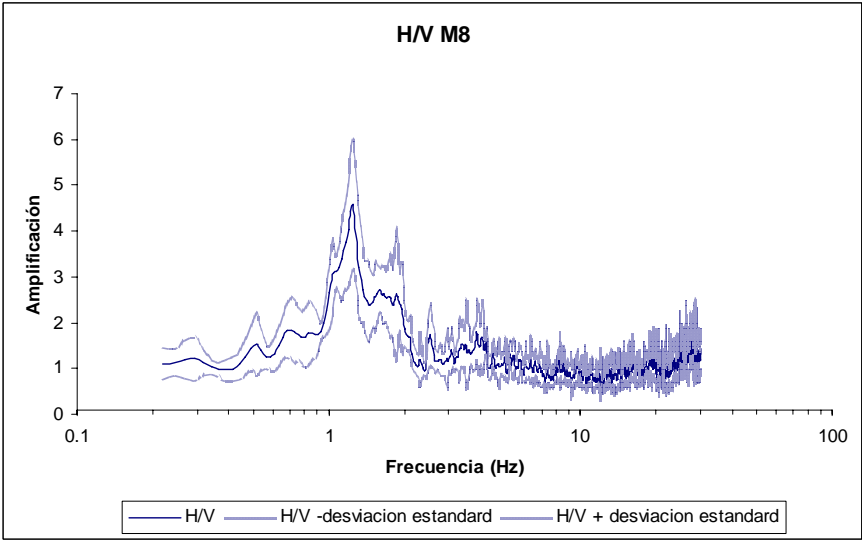
F <sub>0</sub>	F <sub>0</sub>	F <sub>0</sub>	Diques de cuarzo
----------------	----------------	----------------	------------------

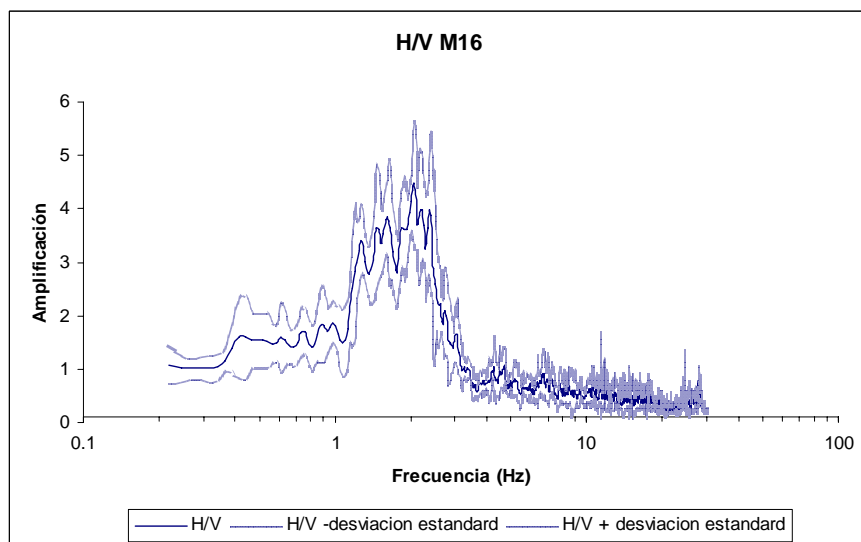
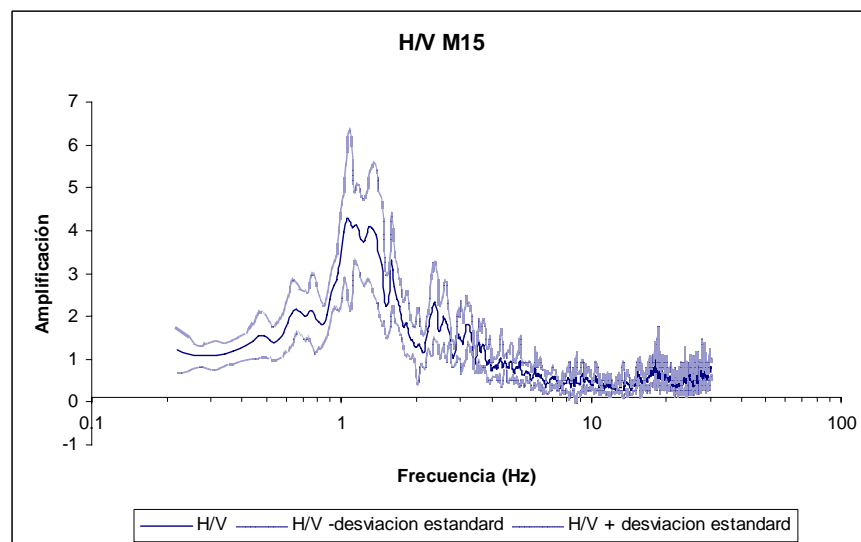
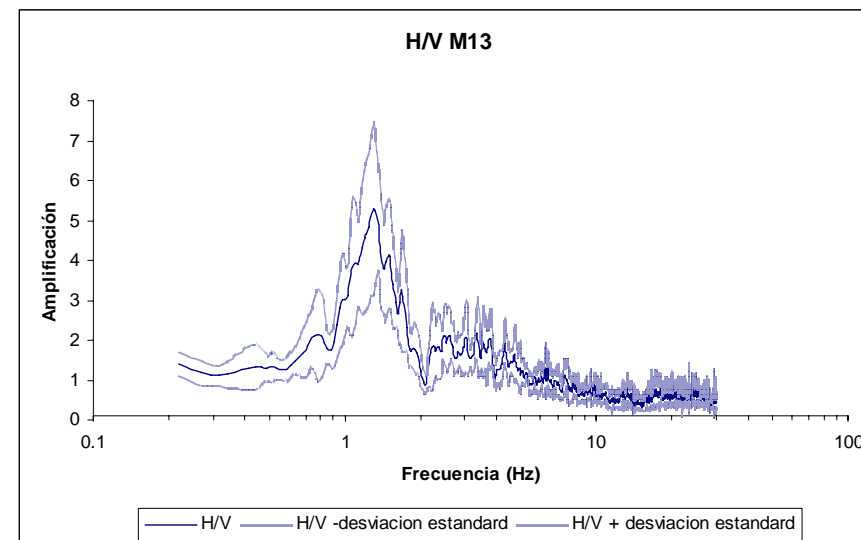
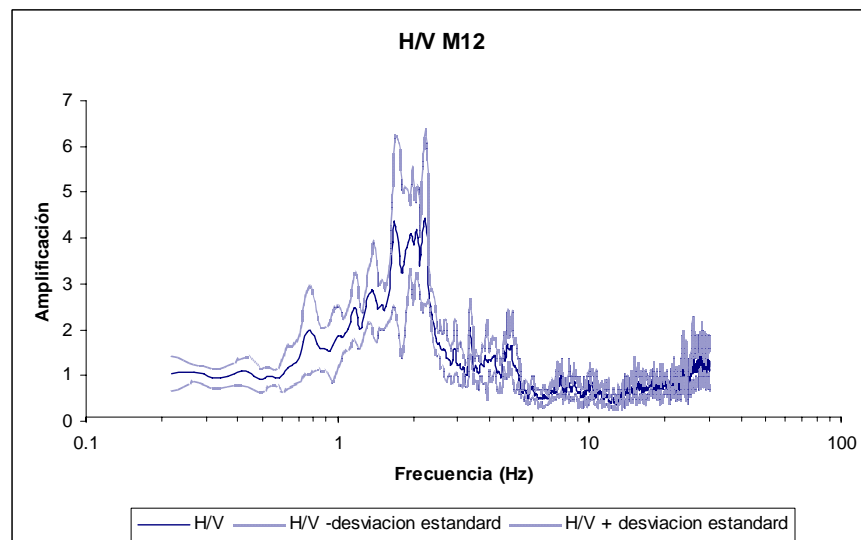
Leyenda del mapa geológico de la ciudad de Málaga a escala 1:50.000 (Estévez y Chamón, 1978).

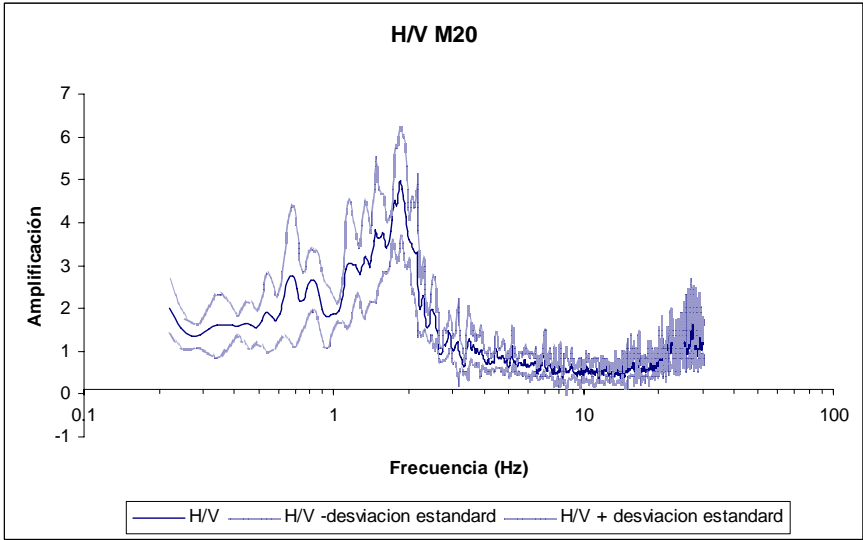
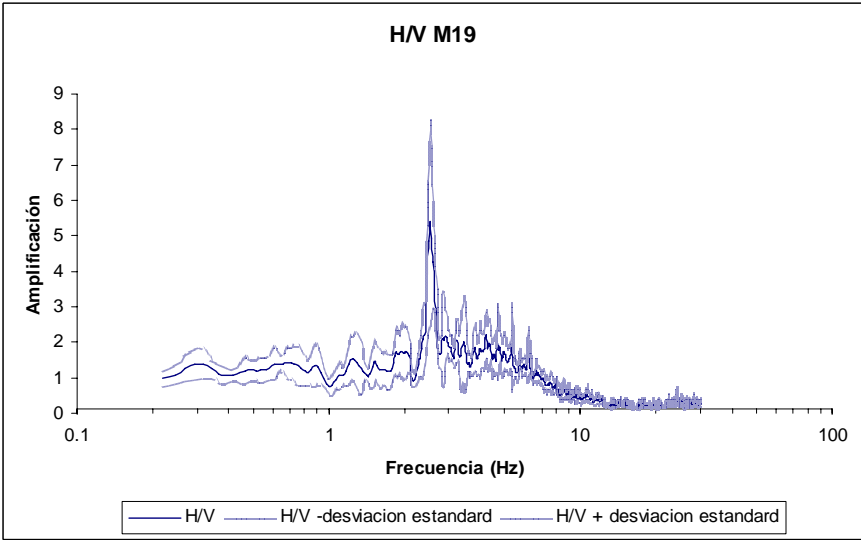
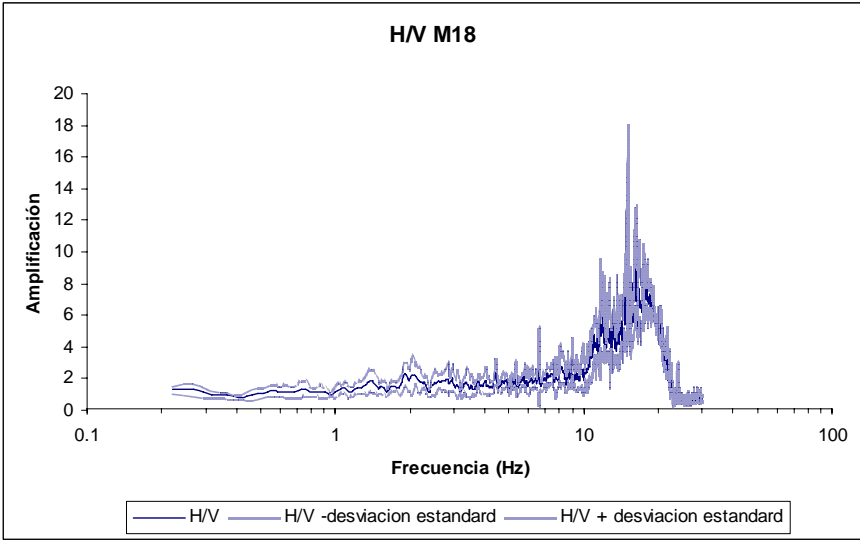
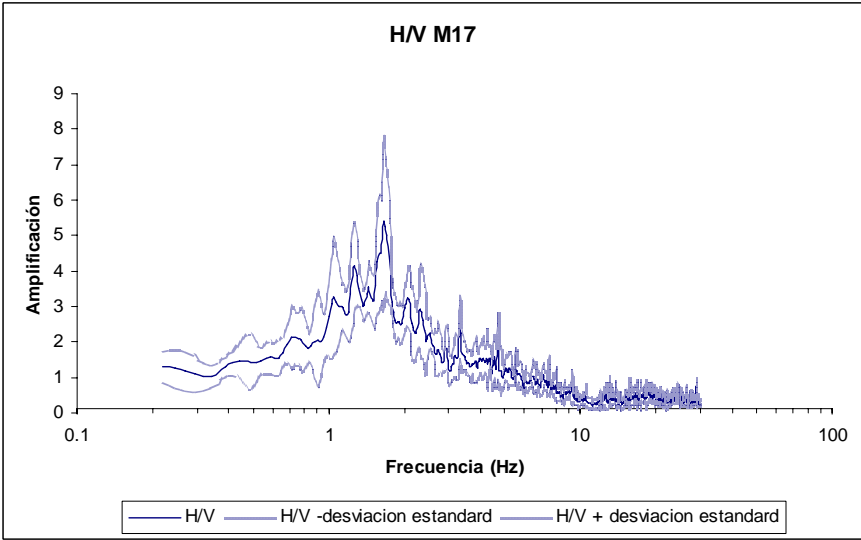


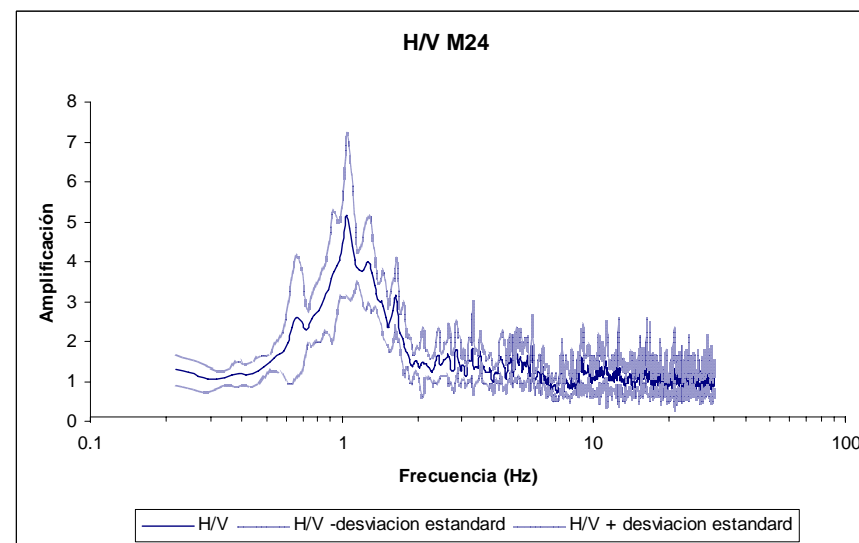
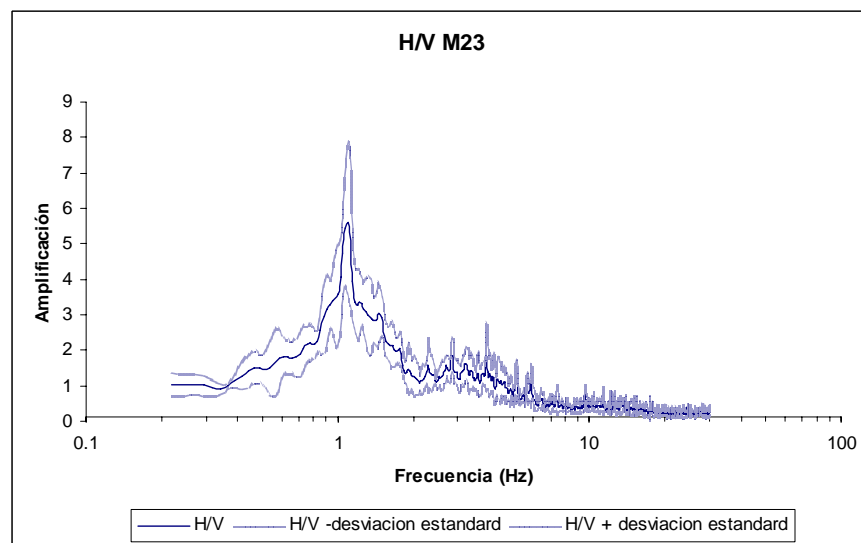
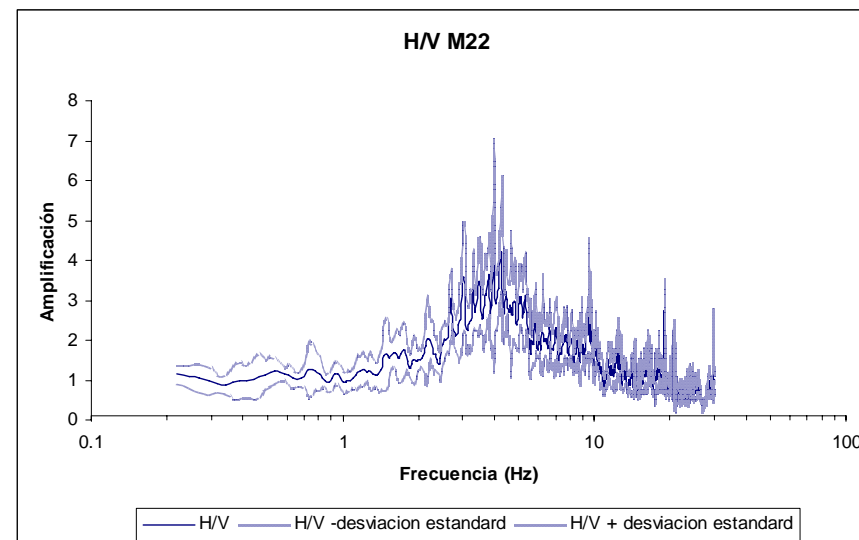
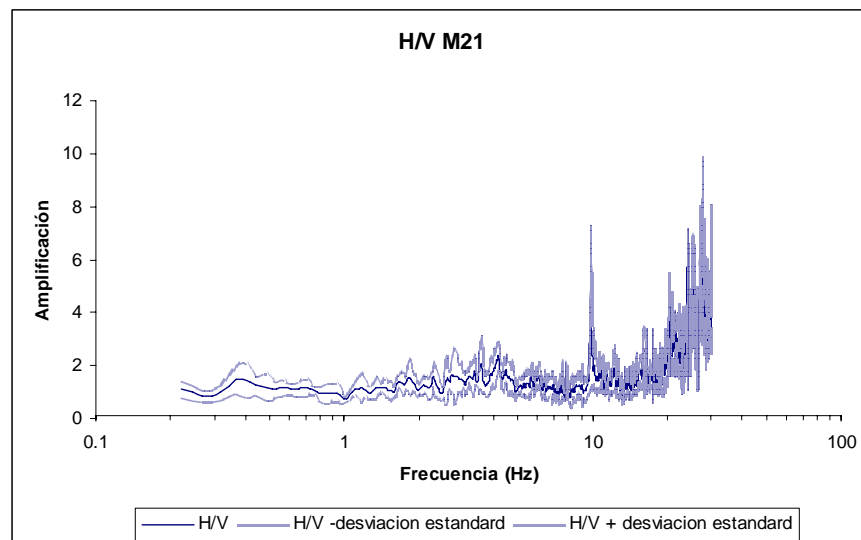
## **Anexo II. Cocientes espectrales H/V**

Amplificaciones del suelo frente a la frecuencia (Hz). Las líneas superior e inferior corresponden a la desviación estándar. La numeración de las medidas de ruido corresponde a las figuras 4.3 y 4.4 y la tabla 4.2.

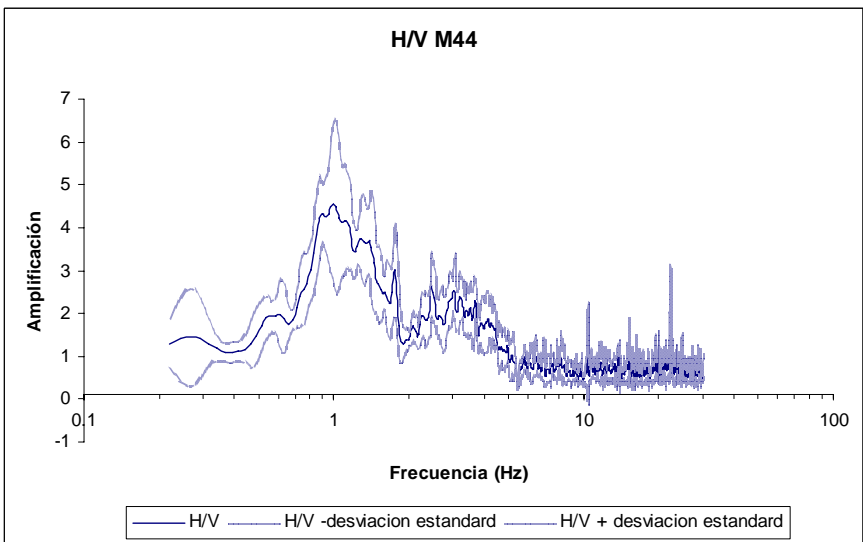
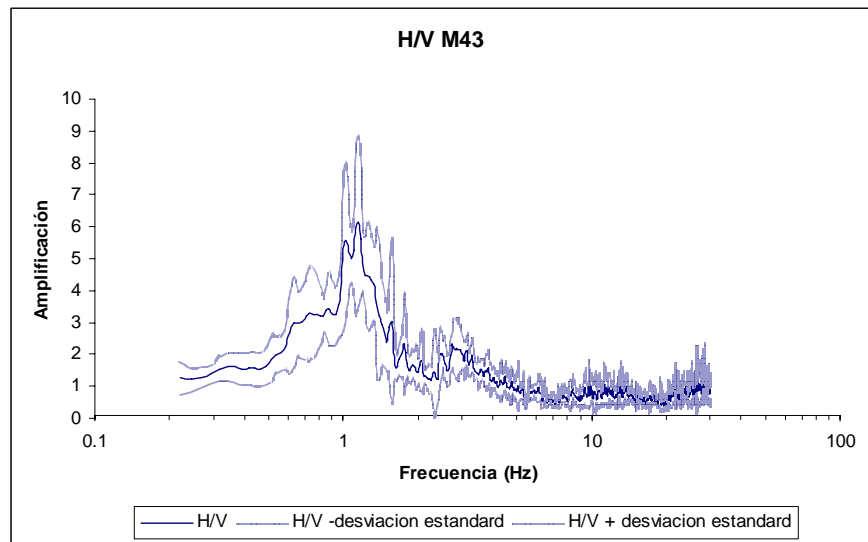
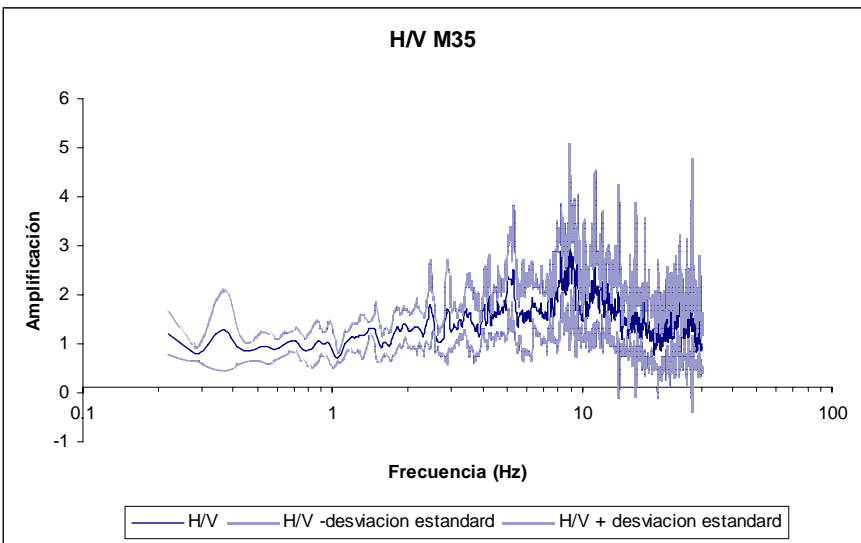
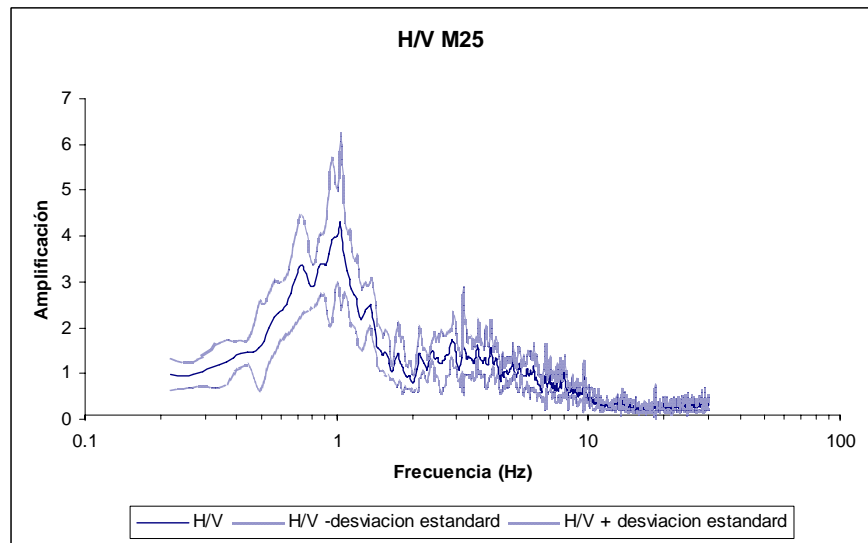


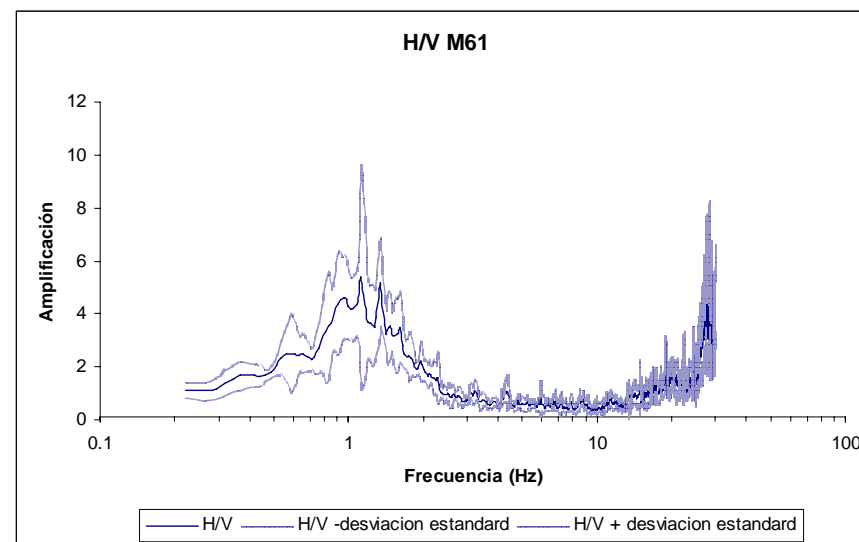
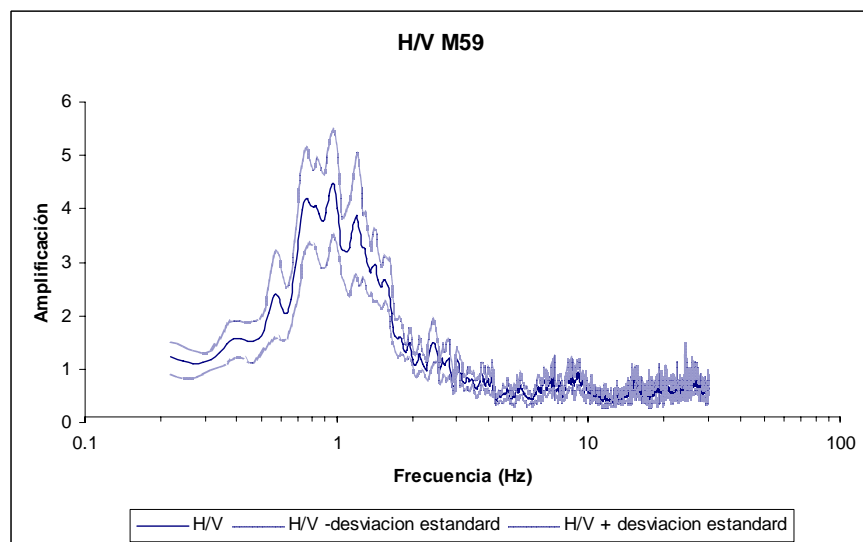
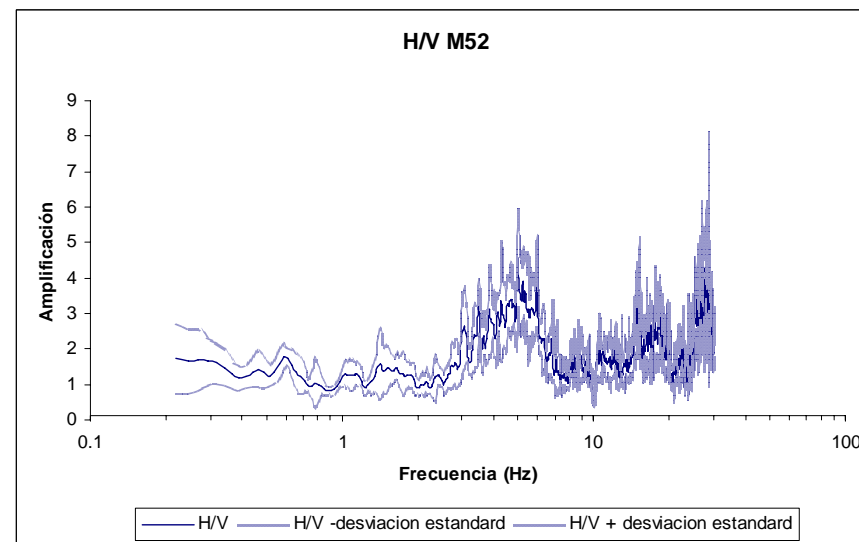
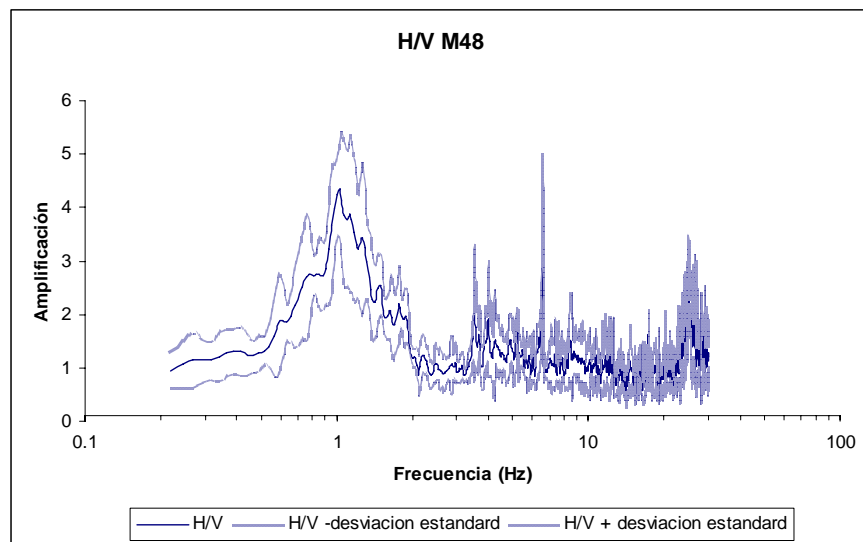


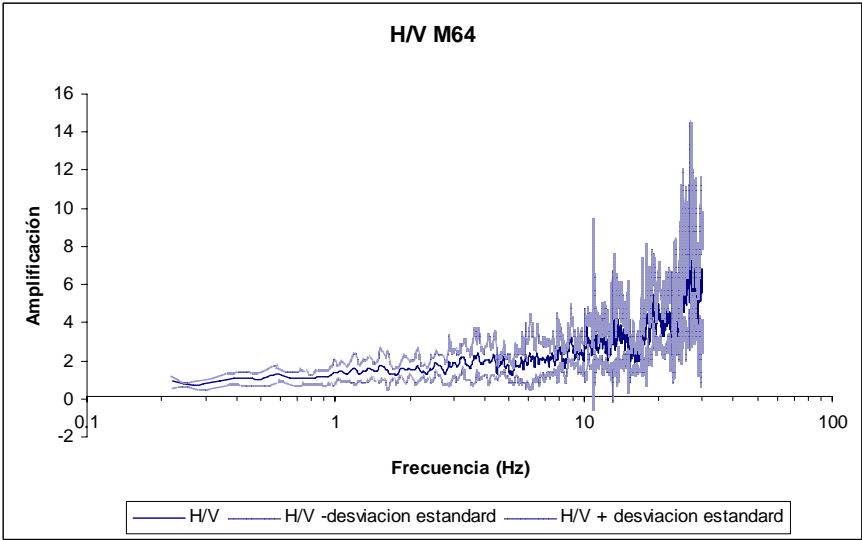
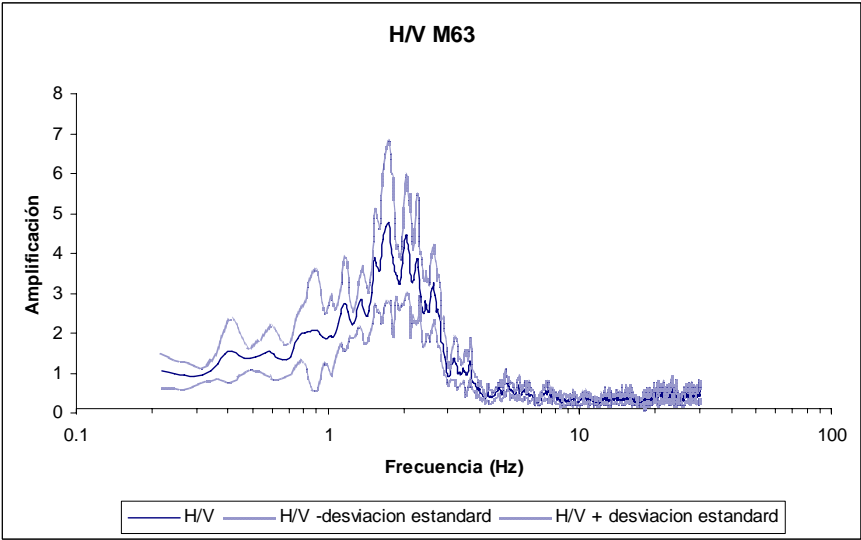
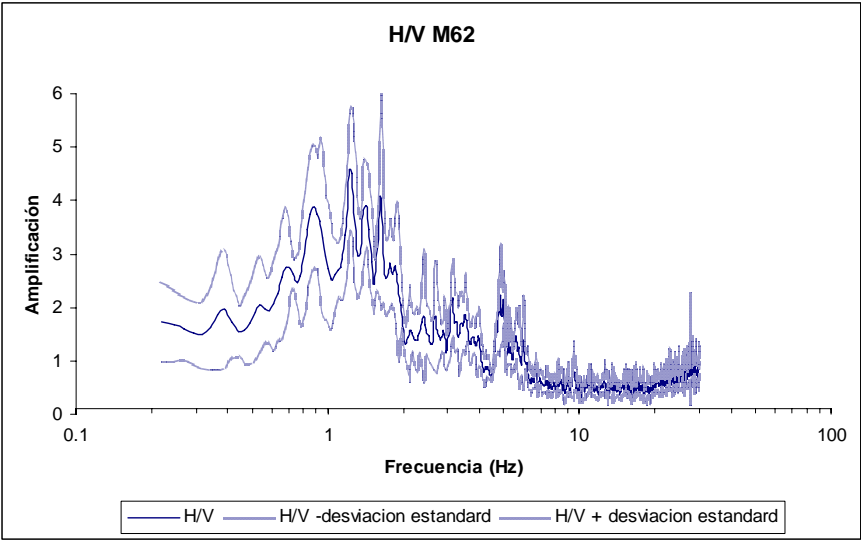












### **Anexo III. Método lineal equivalente**

#### **Caracterización de las columnas de suelo**

La numeración de las columnas corresponde a la de la tabla 4.4.

**ZONA A**Columna 0a (roca)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos antrópicos	3.0	13.3	74.3	234.0	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 1a (5140)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos arqueológicos	12.0	13.3	76.2	237.0	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Gravas, arenas y bolos	6.0	19.6	249.6	353.4	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
3	Macizo rocoso de filitas	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 2a (6385)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos	5.4	13.3	106.6	280.3	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Filitas	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 3a (6843)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos antrópicos: arenas limosas con bolos	7.0	13.3	55.0	201.3	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Grava arenoarcillosa gris	2.0	20.6	180.3	293.0	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
3	Filitas grises	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 4a (5383)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos arqueológicos	5.7	13.3	55.2	201.7	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Gravas	3.3	20.6	241.4	339.0	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
3	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

## ZONA B

Columna 1b (7284)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos antrópicos	5.1	13.3	84.4	249.4	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Arcillas limoarenosas beige	12.7	17.6	167.8	305.8	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
3	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 2b (8372)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos antrópicos	5.5	13.3	84.4	249.4	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Arcillas limoarenosas beige	11.8	17.6	154.7	293.6	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
3	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 3b (37)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos antrópicos	6.6	13.3	17.0	112.0	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Arenas limoarcillosas beige	17.4	18.6	122.9	254.6	Sand (Seed & Idriss) Average	Sand (Seed & Idriss) Average
3	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 4b (173)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos antrópicos	4.0	13.3	70.9	228.6	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Gravas y arenas	7.4	19.6	185.7	304.8	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
3	Sustrato Plioceno: arcillas limosas beige	24.0	17.6	175.5	312.7	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
4	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 5b (276)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos antrópicos	2.7	13.3	42.3	176.6	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Arcillas limosas beige	8.3	17.6	151.6	290.6	Clay – PI 10-20 (Sun et al)	Clay Upper Bound (Sun et al)
3	Plioceno: arcillas limoarenosas	22.5	17.6	191.9	327.0	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
4	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 6b (2047)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Relleno antrópico	3.5	13.3	70.9	228.6	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Arena limosa marrón	2.0	18.6	115.1	246.3	Sand (Seed & Idriss) Average	Sand (Seed & Idriss) Average
3	Arcilla limoarenosa	29.8	17.6	176.8	313.9	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
4	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 7b (7686)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos antrópicos	8.3	13.3	71.9	230.3	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Suelo aluvial: arenas limoarcillosas con bastante grava	3.8	19.6	144.0	268.4	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
3	Suelo aluvial: arenas limoarcillosas con bastante grava	21.8	19.6	192.2	310.1	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
4	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 8b (7740)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos antrópicos	5.5	13.3	69.2	225.9	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Arcillas limoarenosas	28.1	17.6	166.8	304.9	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
3	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 9b (8691)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos antrópicos	6.0	13.3	42.3	176.6	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Aluvial: gravas	15.0	20.6	206.7	313.7	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
3	Sustrato Plioceno: arenas limoarcillosas grises	0.5	18.6	122.9	254.6	Sand (Seed & Idriss) Lower Bound	Sand (Seed & Idriss) Lower Bound
4	Sustrato Plioceno: arenas limoarcillosas grises	18.8	18.6	213.1	335.2	Sand (Seed & Idriss) Lower Bound	Sand (Seed & Idriss) Lower Bound
5	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 10b (221)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos antrópicos	3.5	13.3	60.2	210.7	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Limos y arenas más o menos arcillosas	49.5	17.6	124.7	263.6	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
3	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 11b (1681)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Relleno antrópico	2.5	13.3	56.3	203.7	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Arena limoarcillosa con algo de grava y abundantes bolos	7.0	19.6	123.4	248.5	Sand (Seed & Idriss) Average	Sand (Seed & Idriss) Average
3	Arcilla limoarenosa marrón	56.5	17.6	204.7	337.7	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
4	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 12b (3926)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos	1.5	13.3	60.2	210.7	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Arena limosa marrón	4.5	18.6	101.6	231.4	Sand (Seed & Idriss) Average	Sand (Seed & Idriss) Average
3	Arcilla limosa beige	3.0	17.6	134.8	274.1	Clay – PI 10-20 (Sun et al)	Clay Upper Bound (Sun et al)
4	Arcilla limosa gris	43.5	17.6	148.3	287.5	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
5	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 13b (5335)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Relleno antrópico	2.5	13.3	48.5	189.2	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Arena arcillosa	0.5	18.6	111.4	242.4	Sand (Seed & Idriss) Average	Sand (Seed & Idriss) Average
3	Grava arenoarcillosa	16.5	20.6	252.6	346.8	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
4	Arcilla limoarenosa gris	4.5	17.6	172.7	310.2	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
5	Arcilla limoarenosa gris	43.0	17.6	248.1	371.8	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
6	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)



Columna 14b (6440)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Arena arcillosa	1.0	13.3	56.3	203.7	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Arena arcillosa con bastante grava	2.5	19.6	123.4	248.5	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
3	Arcilla limosa	2.5	17.6	204.7	337.7	Clay – PI 10-20 (Sun et al)	Clay Upper Bound (Sun et al)
4	Limo arcilloso	4.0	17.2	107.4	245.3	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
5	Limo arcilloso	56.3	17.2	216.6	351.4	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
6	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 15b (6784)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Relleno antrópico	5.4	13.3	60.2	210.7	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Grava con bastante arena	51.7	19.6	212.5	326.1	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
3	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 16b (7617)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos antrópicos	1.5	13.3	60.2	210.7	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Gravas y arenas	6.5	19.6	184.6	303.9	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
3	Sustrato Plioceno: arcilla limosa beige	4.1	17.6	204.7	337.7	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
4	Sustrato Plioceno: arcilla limosa beige	63.9	17.6	236.1	362.7	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
5	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 17b (7624)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos antrópicos	5.5	13.3	25.6	137.5	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Limo arenoarcilloso	8.6	17.2	46.2	160.9	Clay – PI 10-20 (Sun et al)	Clay Upper Bound (Sun et al)
3	Arenas limoarcillosas beige	4.0	18.6	155.9	286.7	Sand (Seed & Idriss) Lower Bound	Sand (Seed & Idriss) Lower Bound
4	Arenas limoarcillosas beige	19.9	18.6	199.1	324.0	Sand (Seed & Idriss) Lower Bound	Sand (Seed & Idriss) Lower Bound
5	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 18b (4646)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos antrópicos	4.0	13.3	29.7	148.0	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Aluvial: limos y arenas	16.6	17.6	87.6	220.9	Clay – PI 10-20 (Sun et al)	Clay Upper Bound (Sun et al)
3	Plioceno: arcillas limoarenosas grises	20.5	17.6	149.7	288.8	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
4	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 19b (6405)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos antrópicos	3.5	13.3	67.5	223.1	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Aluvial: arenas y gravas limosas	8.5	19.6	122.0	247.1	Sand (Seed & Idriss) Average	Sand (Seed & Idriss) Average
3	Sustrato aluvial: arenas limosas con bastante grava	0.5	19.6	135.2	260.1	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
4	Sustrato aluvial: arenas limosas con bastante grava	33.8	19.6	214.4	327.5	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
5	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 20b (1972)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Relleno antrópico	4.5	13.3	42.3	176.6	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Grava arenosa	3.0	20.6	247.7	343.4	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
3	Arcilla limoarenosa marrón	1.9	17.6	84.7	217.3	Clay – PI 10-20 (Sun et al)	Clay Upper Bound (Sun et al)
4	Arena arcillosa	1.9	18.6	128.3	260.1	Sand (Seed & Idriss) Lower Bound	Sand (Seed & Idriss) Lower Bound
5	Arcilla arenosa marrón	48.2	17.6	157.8	296.5	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
6	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 21b (6957)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos antrópicos	2.2	13.3	47.4	186.9	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Arenas con altas concentraciones de grava	5.8	19.6	104.1	228.2	Sand (Seed & Idriss) Average	Sand (Seed & Idriss) Average
3	Arenas limosas	7.0	18.6	100.1	229.7	Sand (Seed & Idriss) Lower Bound	Sand (Seed & Idriss) Lower Bound
4	Gravas	3.6	20.6	231.4	331.9	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
5	Sustrato Plioceno: arcillas limosas beige	6.9	17.6	149.7	288.8	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
6	Sustrato Plioceno: arcillas limosas beige	32.8	17.6	238.3	364.4	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
7	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 22b (8725)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos antrópicos	2.0	13.3	47.4	186.9	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Arenas y limos	5.5	17.6	87.2	220.4	Sand (Seed & Idriss) Average	Sand (Seed & Idriss) Average
3	Arenas	9.0	18.6	73.3	196.6	Sand (Seed & Idriss) Lower Bound	Sand (Seed & Idriss) Lower Bound
4	Gravas	5.5	20.6	222.0	325.1	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
5	Sustrato Plioceno: arcillas limosas beige	8.0	17.6	145.1	284.3	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
6	Sustrato Plioceno: arcillas limosas beige	26.2	17.6	245.2	369.6	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
7	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 23b (8777)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos antrópicos	3.9	13.3	49.7	191.5	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Arcillas arenosas	3.5	17.6	84.7	217.3	Clay – PI 10-20 (Sun et al)	Clay Upper Bound (Sun et al)
3	Arenas y gravas	8.8	19.6	124.0	249.1	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
4	Sustrato Plioceno: arcillas limosas beige	4.9	17.6	145.1	284.3	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
5	Sustrato Plioceno: arcillas limosas beige	39.4	17.6	231.3	359.0	Clay – PI 20-40 (Sun et al)	Clay Lower Bound (Sun et al)
6	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 24b (2005)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Relleno antrópico	5.0	13.3	52.0	195.8	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Gravas arenolimosas	57.2	19.6	277.5	372.6	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
3	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

Columna 25b (7036)

Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Rellenos	2.6	13.3	52.0	195.8	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Arena arcillosa roja	1.9	18.6	96.4	225.4	Sand (Seed & Idriss) Average	Sand (Seed & Idriss) Average
3	Gravas limoarcillosas	7.5	19.6	198.4	315.1	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
4	Gravas limoarcillosas	56.8	19.6	255.0	357.2	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
5	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

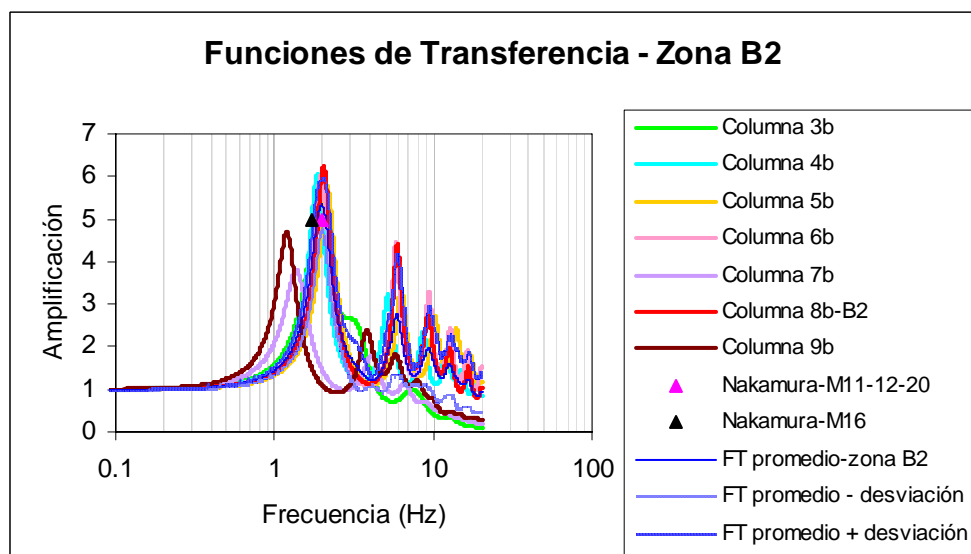
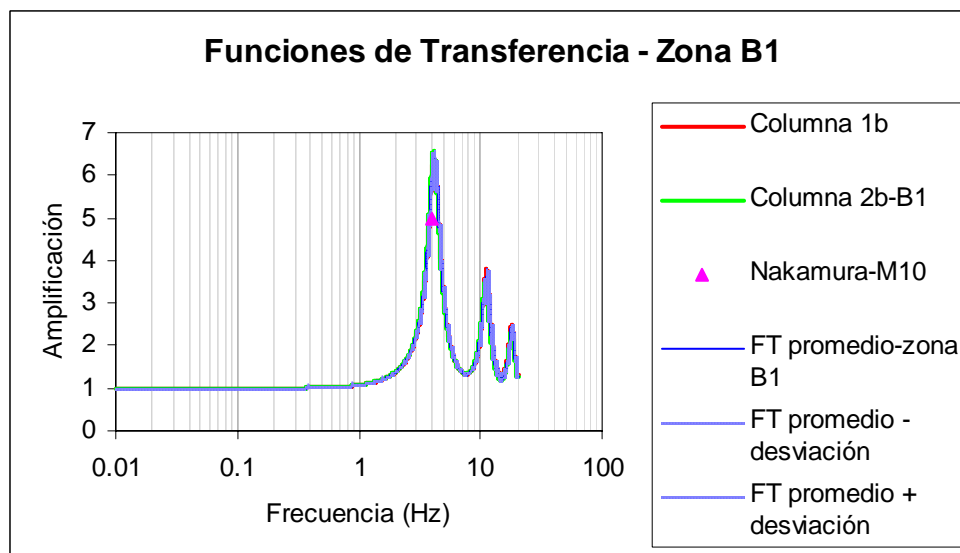
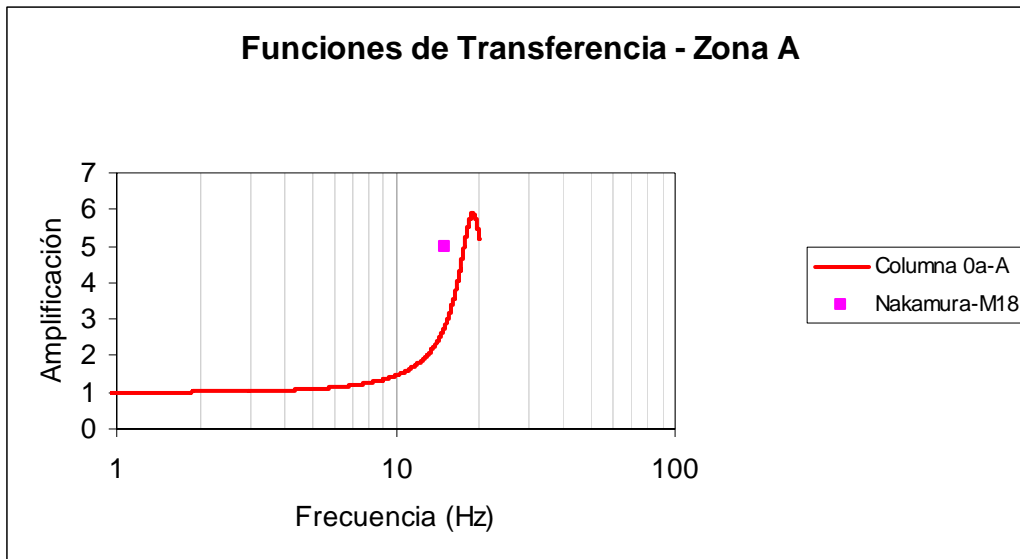
### ZONA C

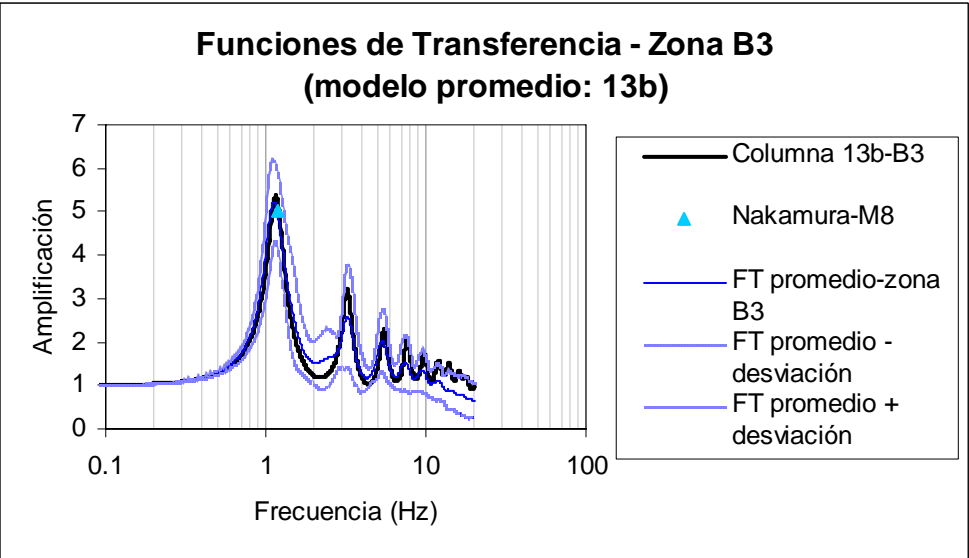
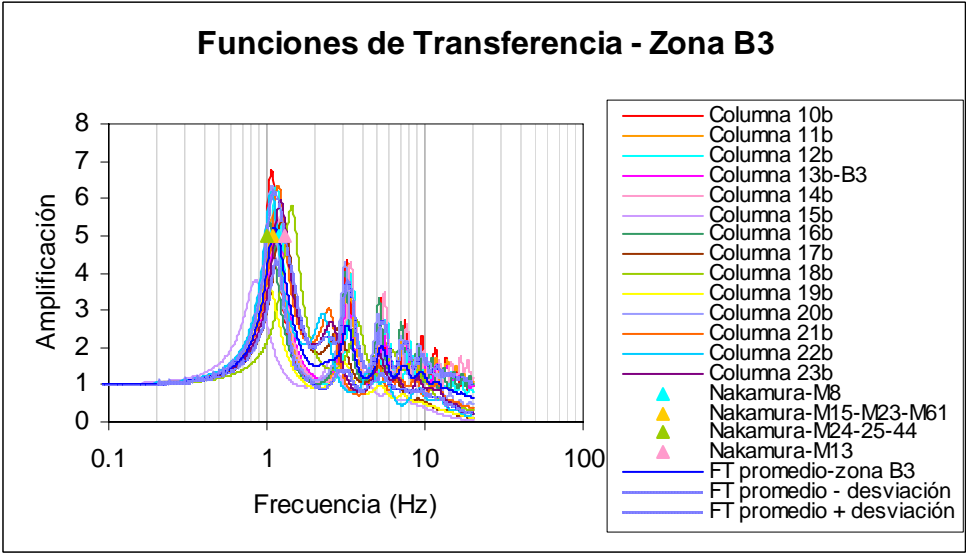
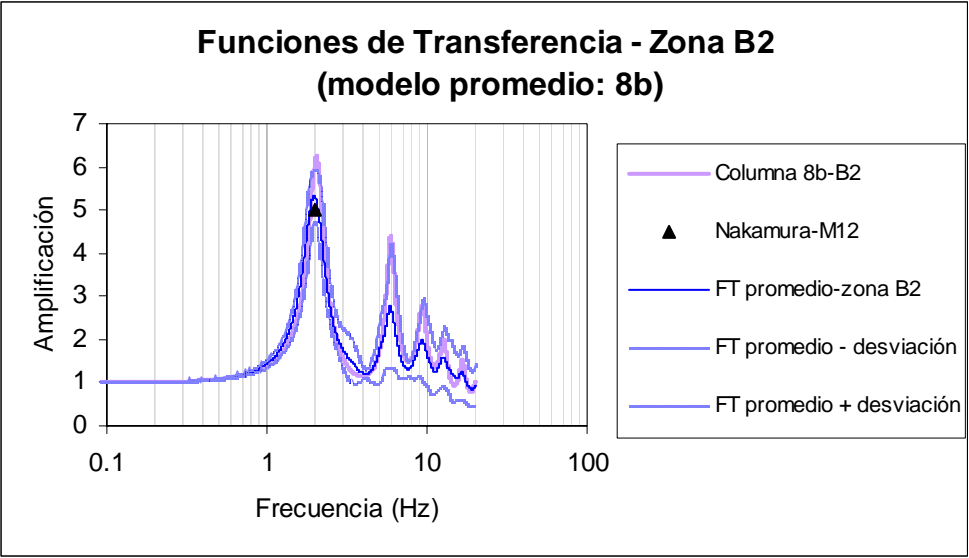
Columna 1c (7494)

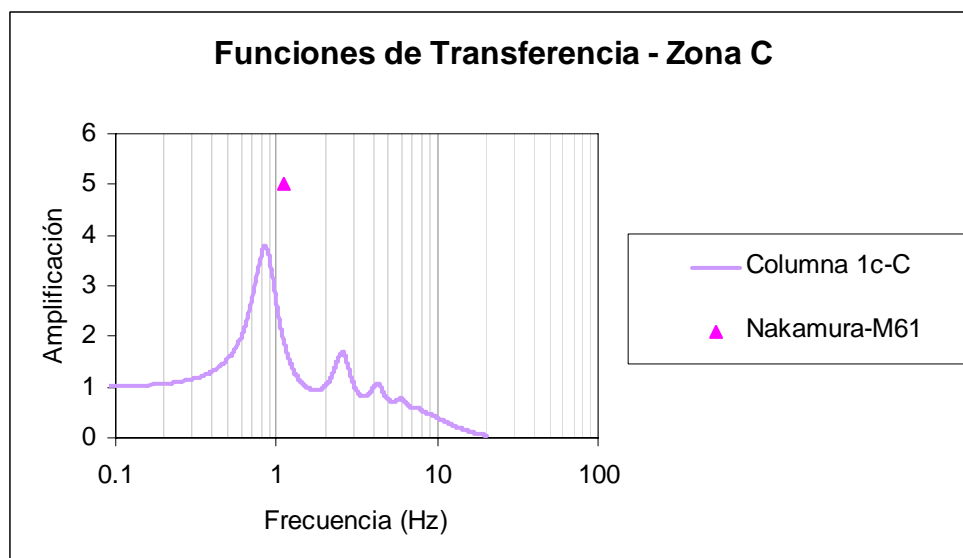
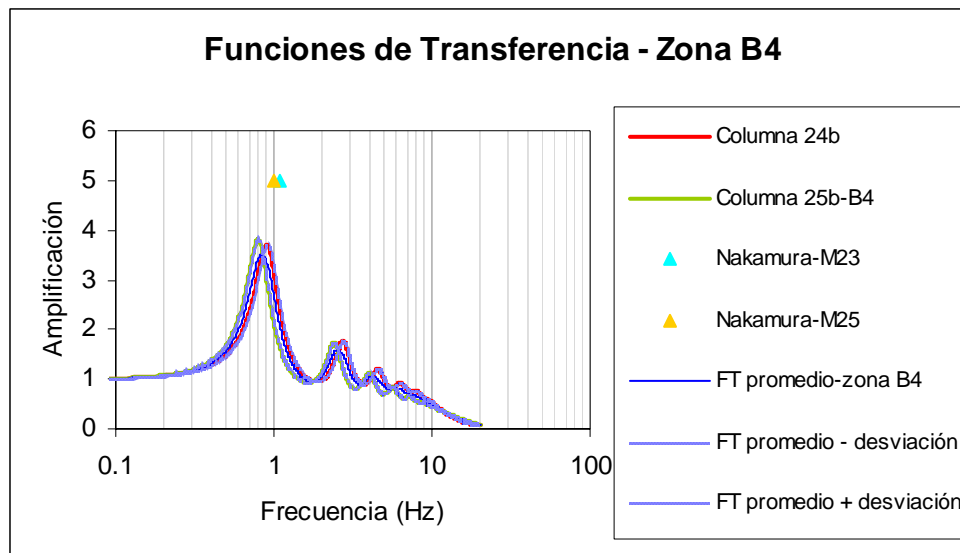
Capa	Tipo de material	Grosor (m)	Peso unitario (kN/m <sup>3</sup> )	Gmax (MPa)	V <sub>s</sub> (m/s)	Curva variación del módulo	Curva amortiguamiento
1	Relleno	4.0	13.3	59.5	209.4	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound	Sand (Seed & Idriss) Upper Bound
2	Aluvial reciente: arena limosa marrón	2.0	18.6	93.6	222.1	Sand (Seed & Idriss) Average	Sand (Seed & Idriss) Average
3	Grava arenolimsa y arena arcillosa	52.5	19.6	222.4	333.6	Gravel (Seed et al.)	Gravel (Seed et al.)
4	Esquistos	∞	25.0	5735.8	1500.0	Rock (Idriss)	Rock (Idriss)

### **Funciones de transferencia**

Funciones de transferencia para las seis subzonas de la microzonación obtenida en este estudio, y valor promedio para cada subzona. En las subzonas en que existe una gran cantidad de columnas de suelo, se muestra por separado la función de transferencia seleccionada como modelo de la subzona.









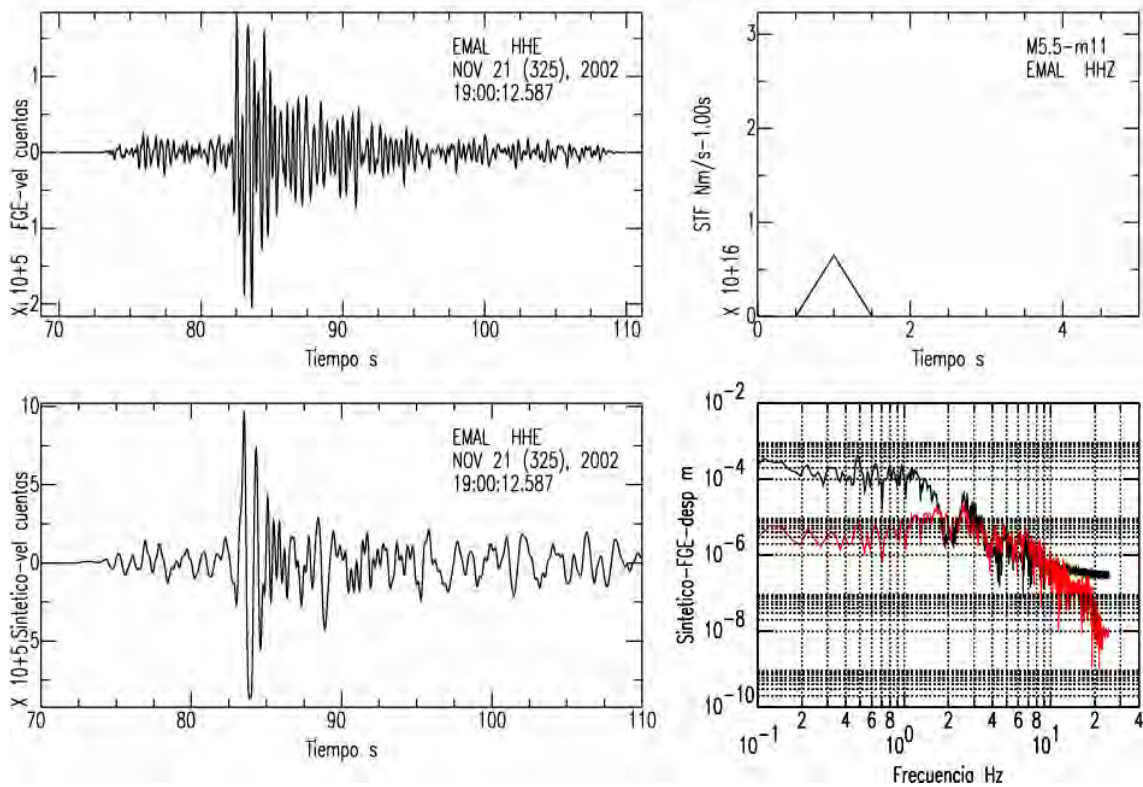


## **Anexo IV. Método de las funciones de Green empíricas**

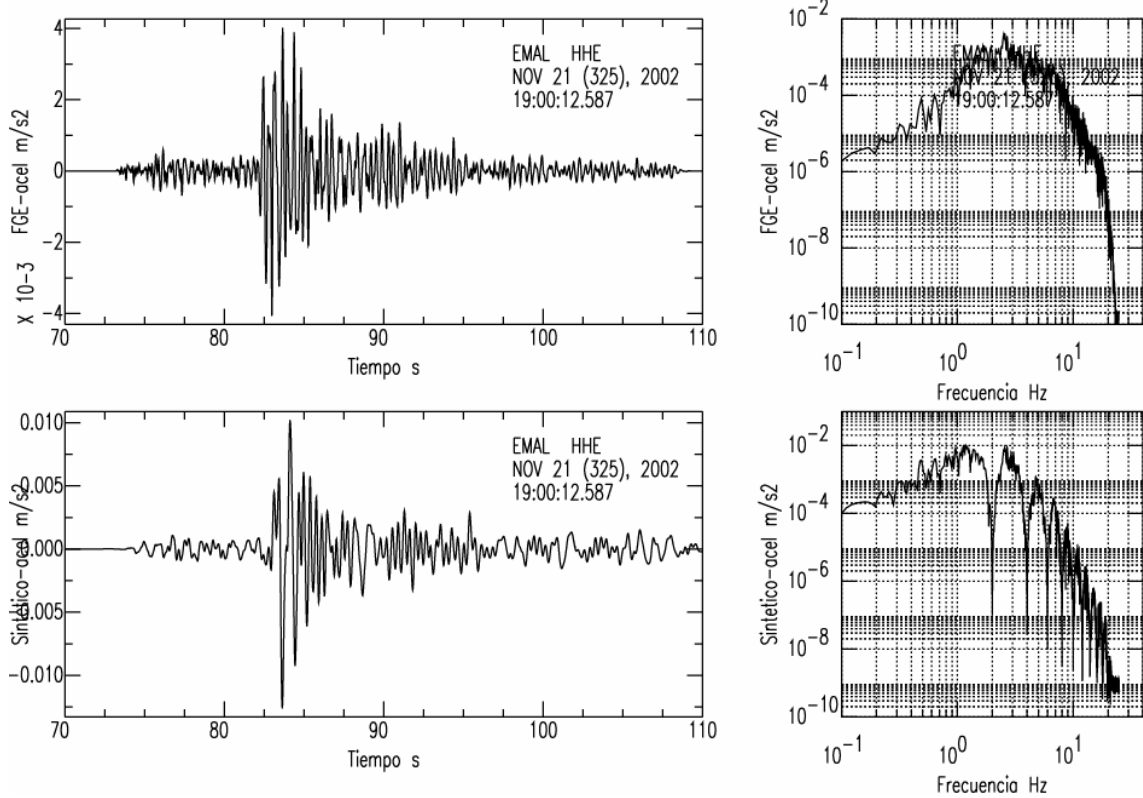
Sismograma utilizado como EGF ( $M_w=4.3$ ), sismograma teórico generado para un sismo de  $M_w=5.5$ , 6.5 y 7.0, STF utilizada, y espectros de desplazamiento de la EGF (en rojo), y el registro teórico (en negro), para las componentes este-oeste, norte-sur y vertical.

Registros de aceleración para la función de Green empírica y el registro teórico de  $M_w=5.5$ , 6.5 y 7.0, así como sus espectros de aceleración, para las componentes este-oeste, norte-sur y vertical.

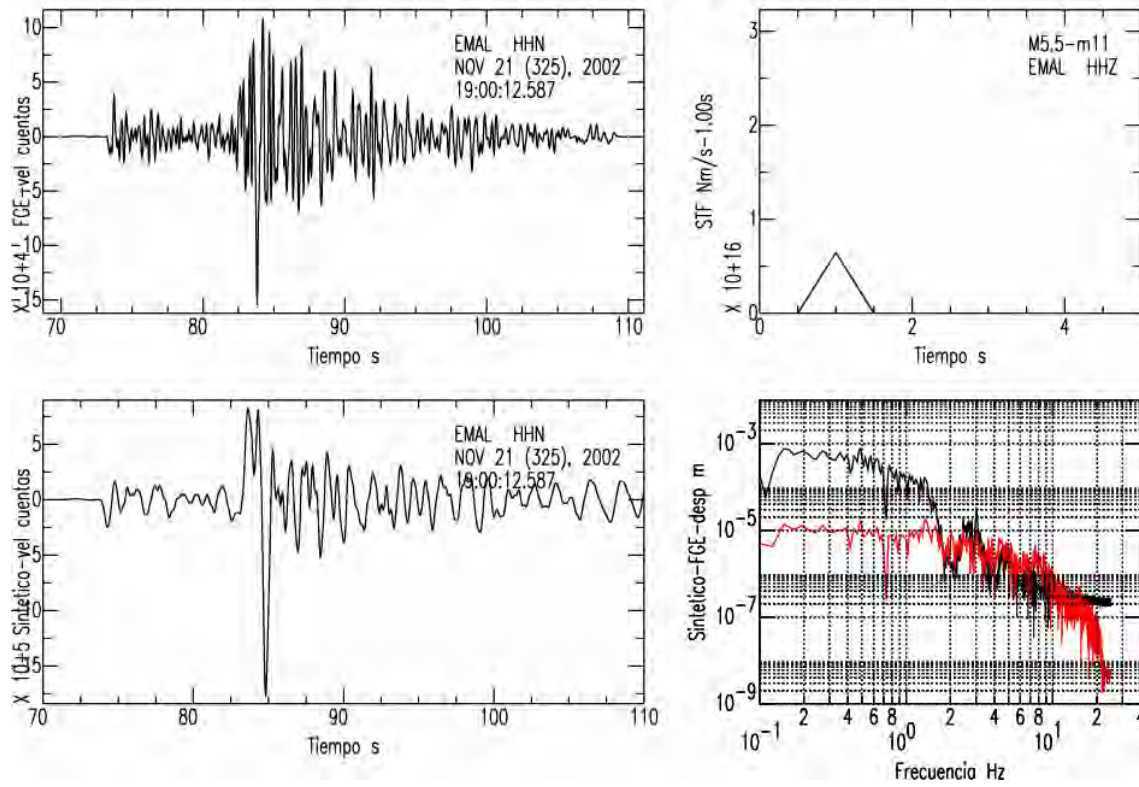
21/11/02, EMAL.E, Mw=5.5



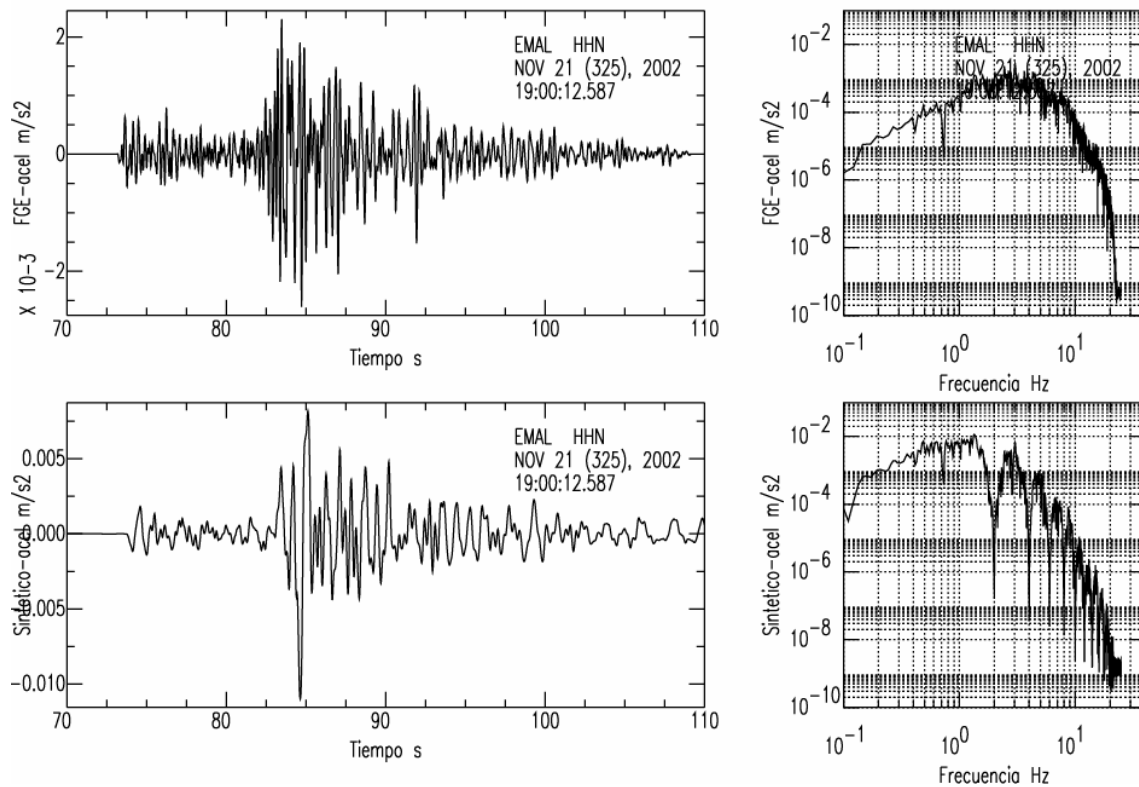
21/11/02, EMAL.E, Mw=5.5

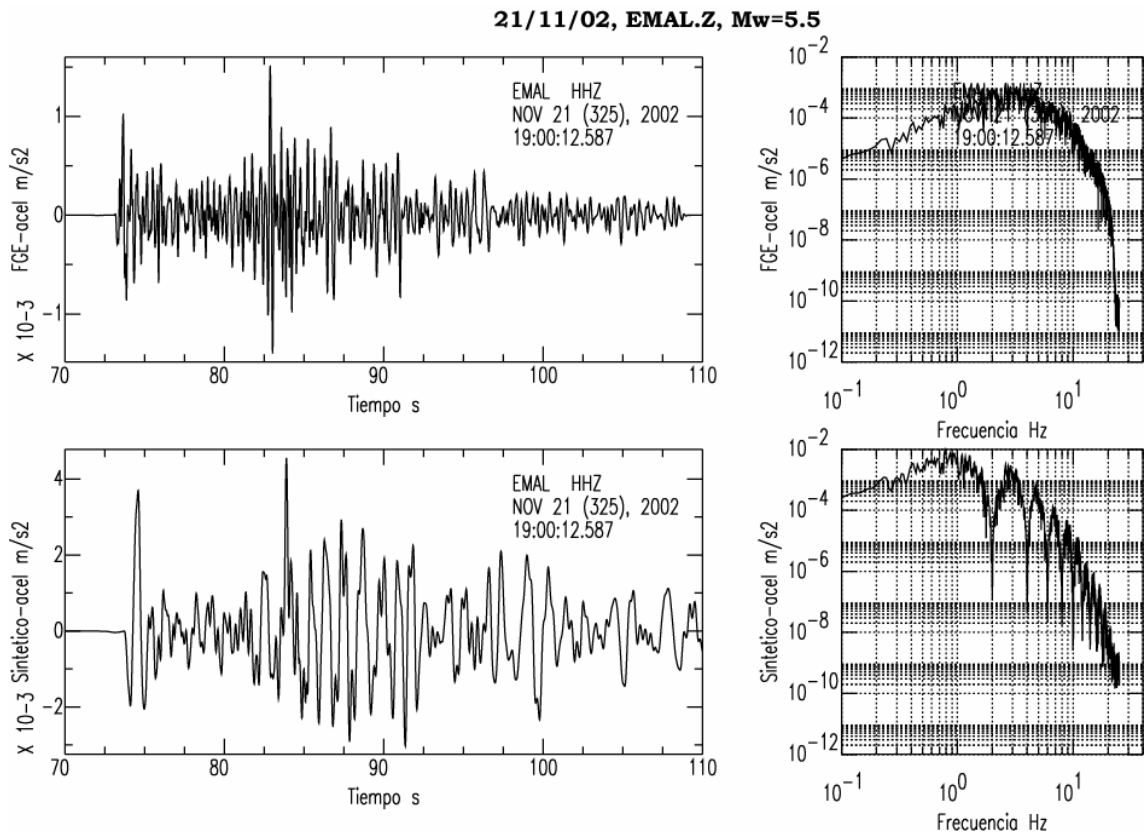
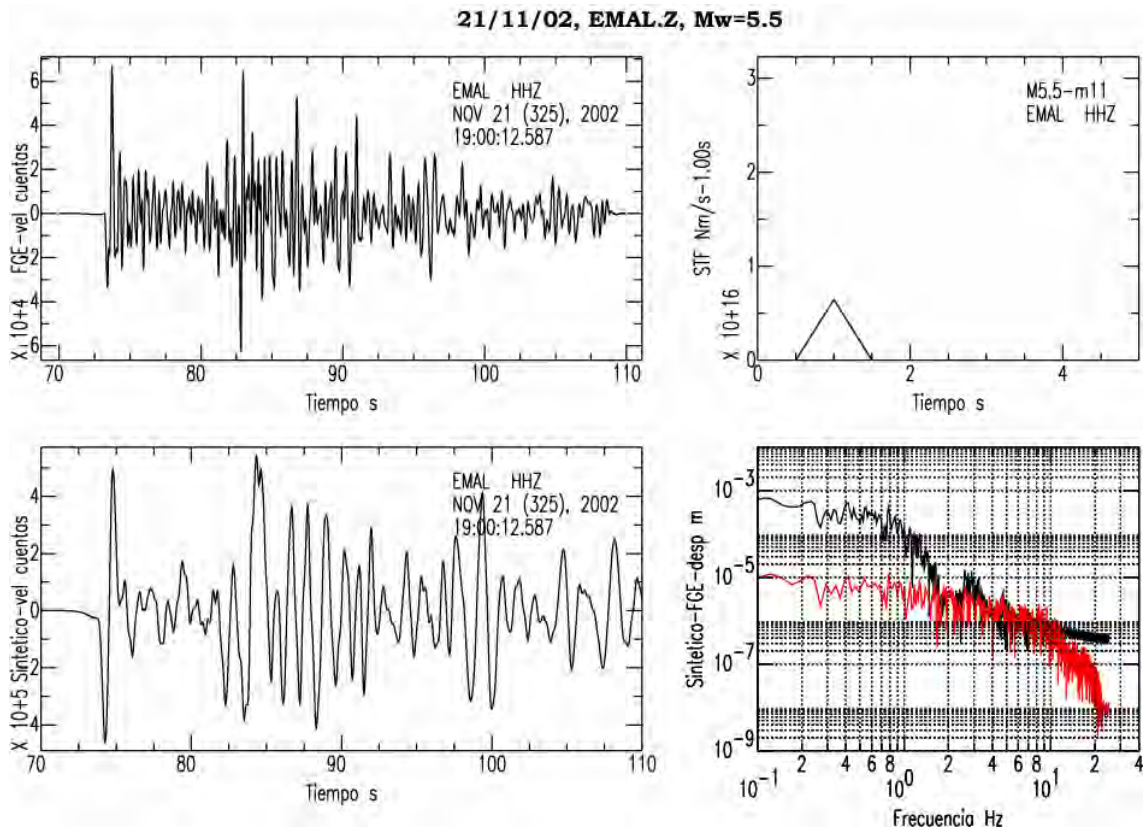


**21/11/02, EMAL.N, Mw=5.5**



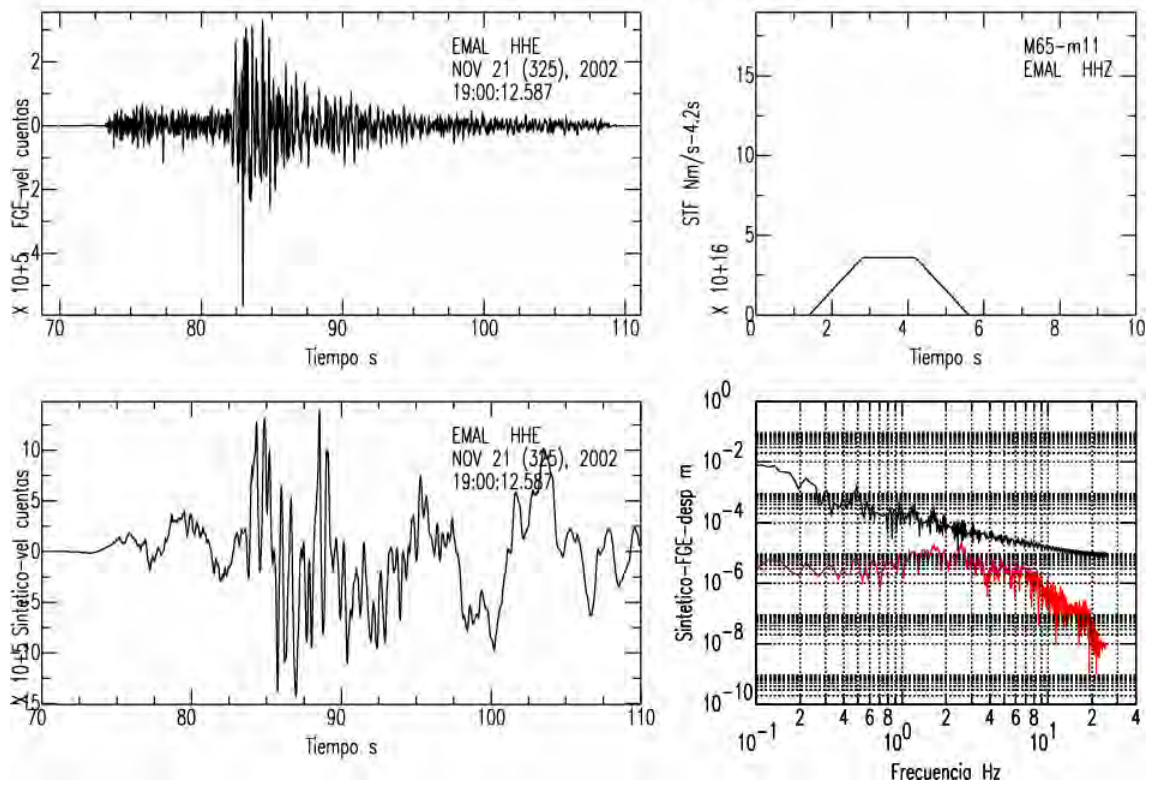
**21/11/02, EMAL.N, Mw=5.5**



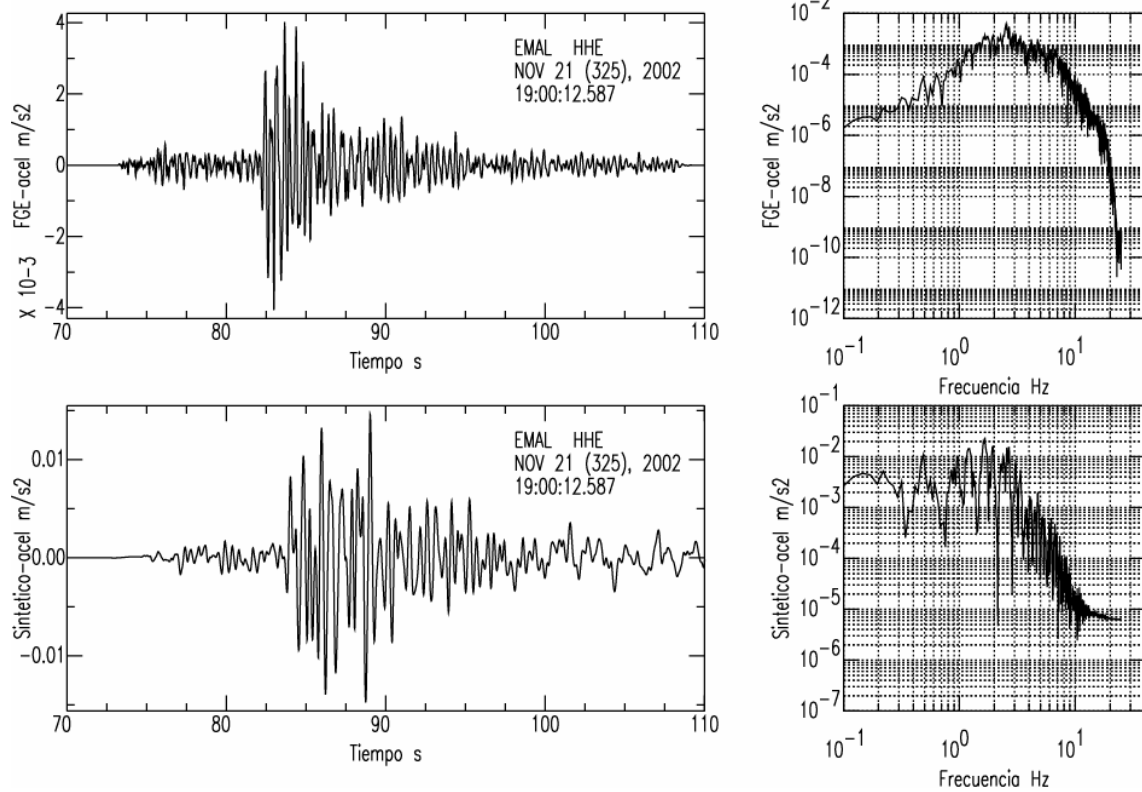


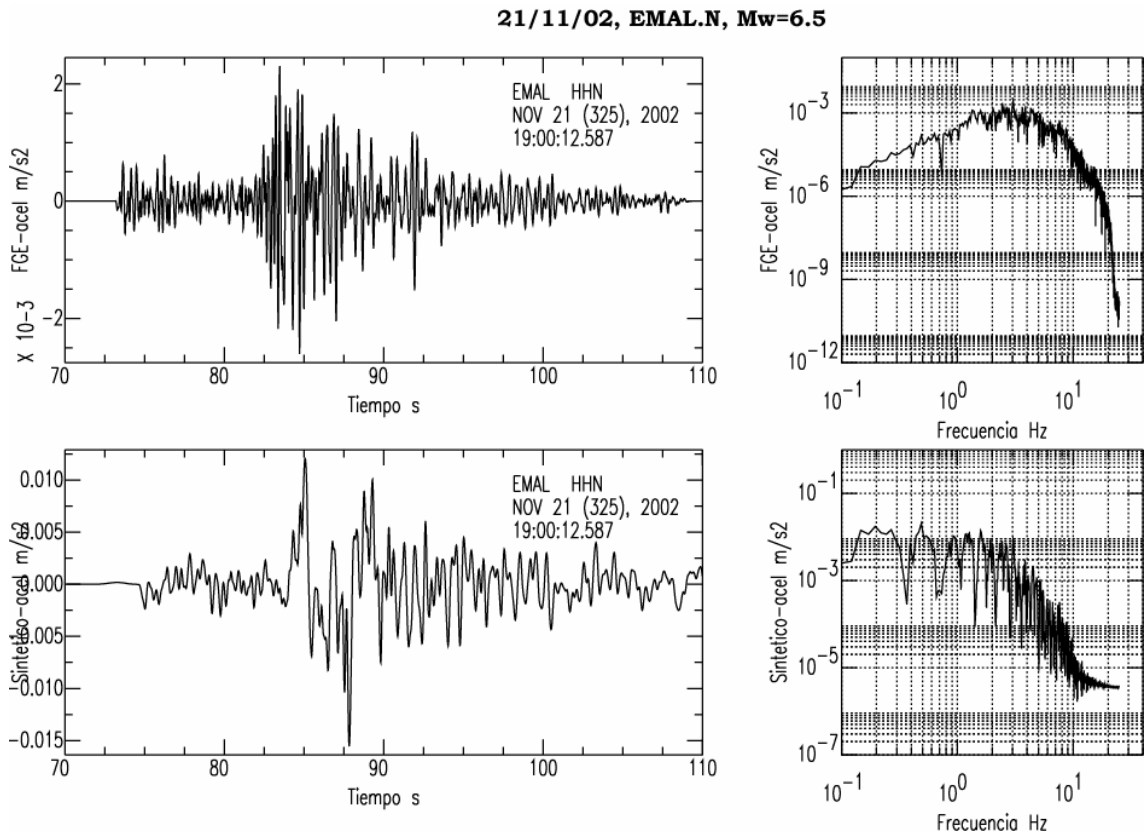
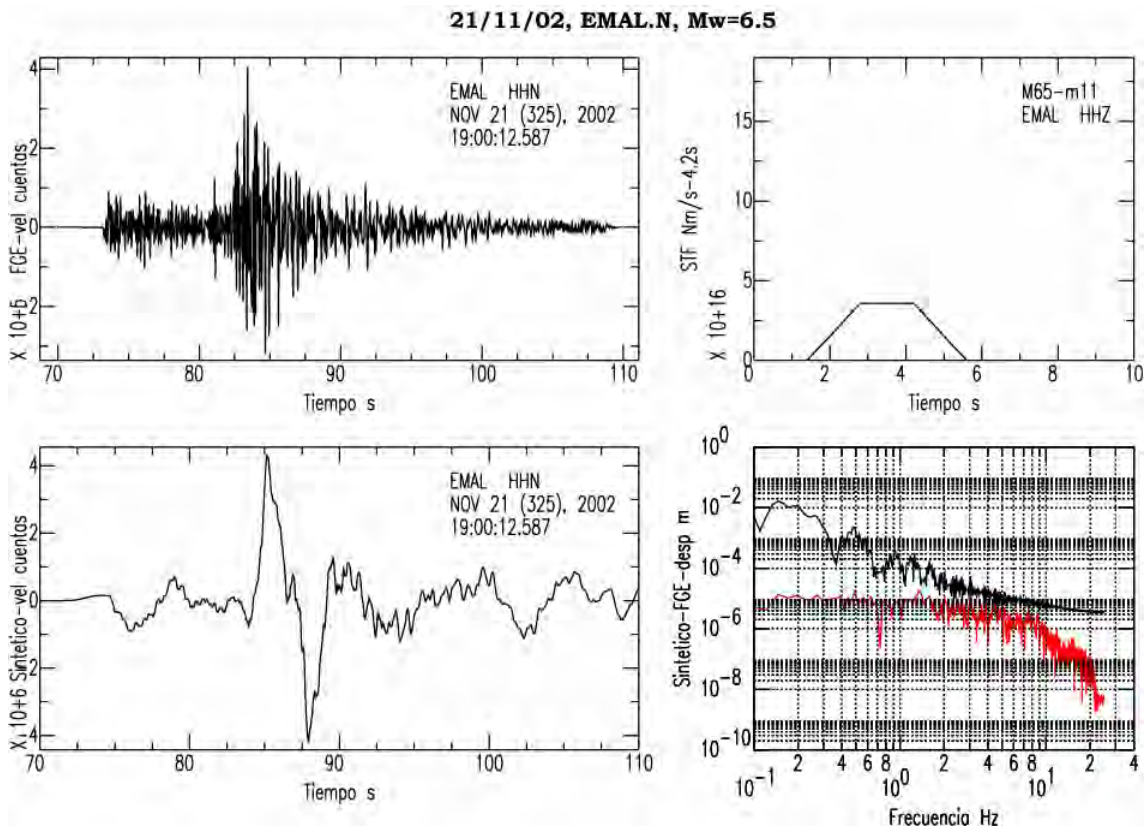


**21/11/02, EMAL.E, Mw=6.5**

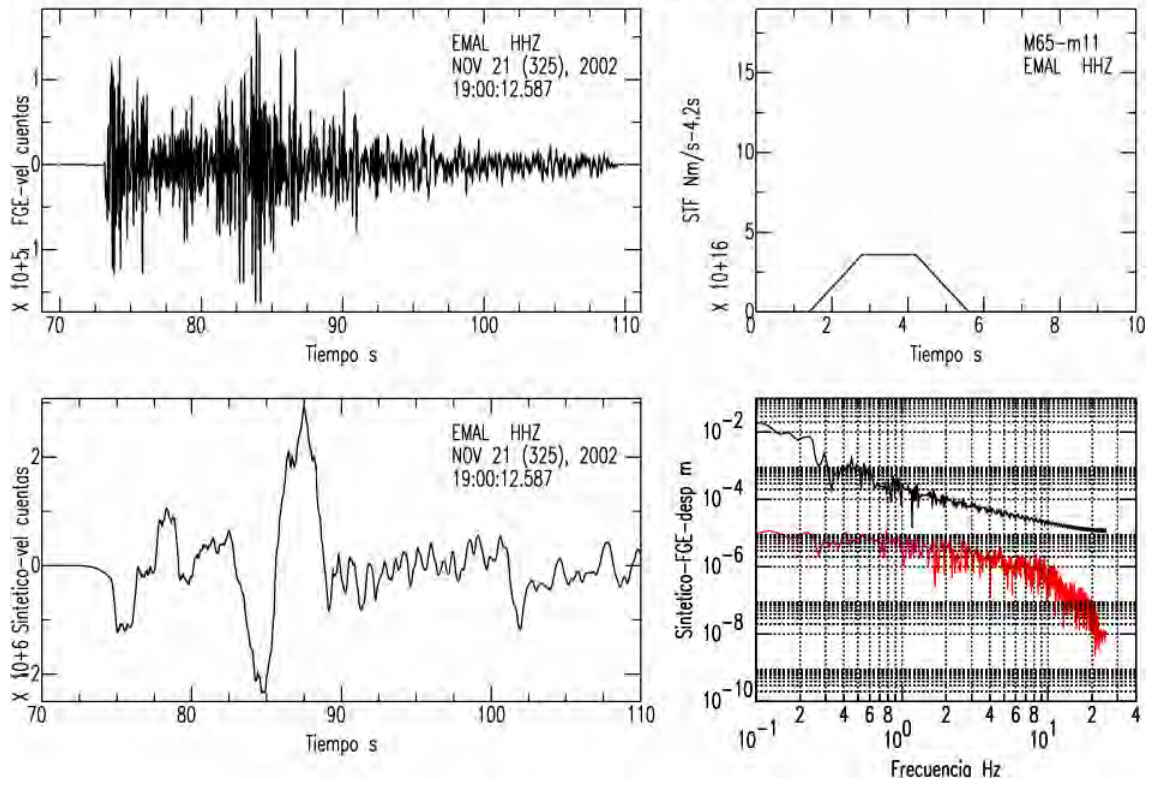


**21/11/02, EMAL.E, Mw=6.5**

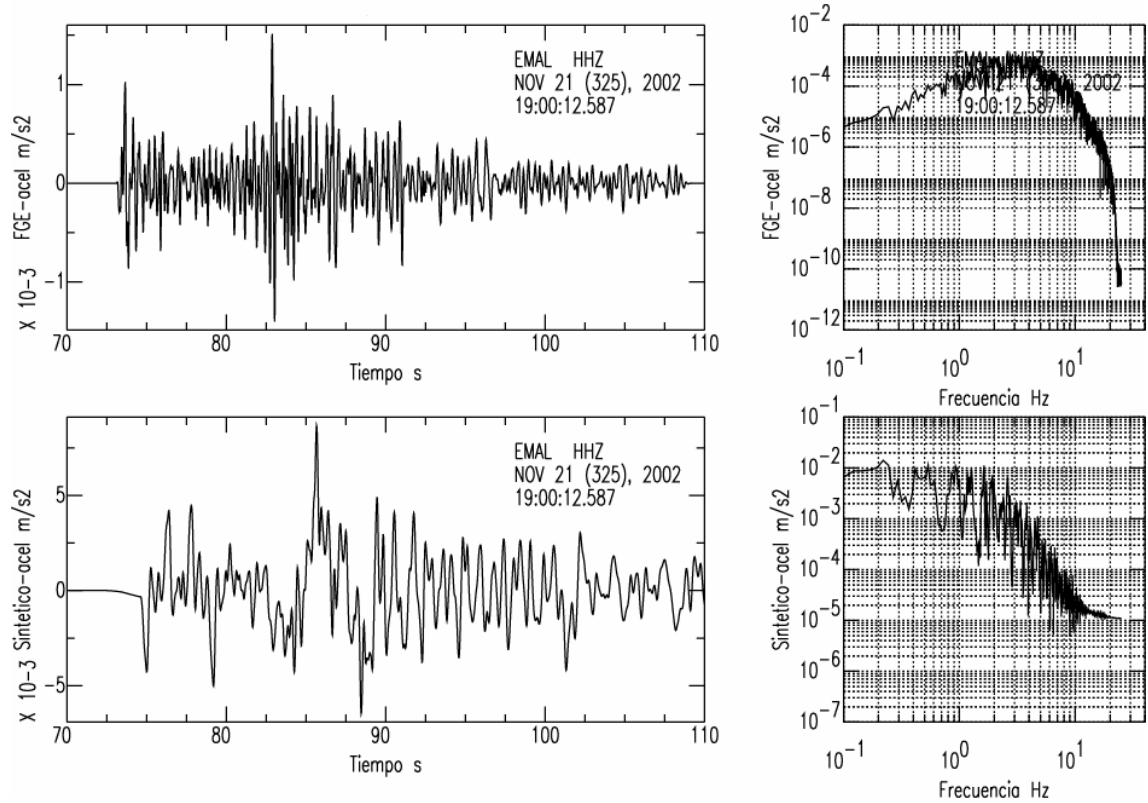




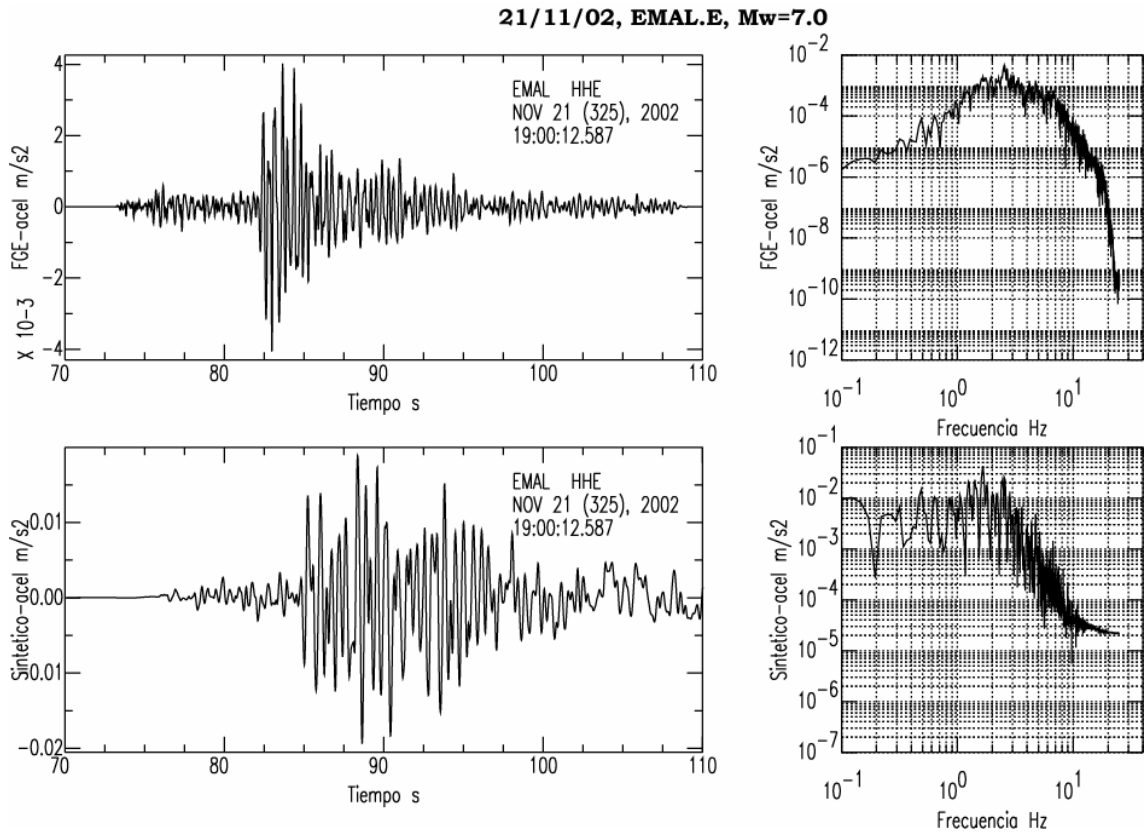
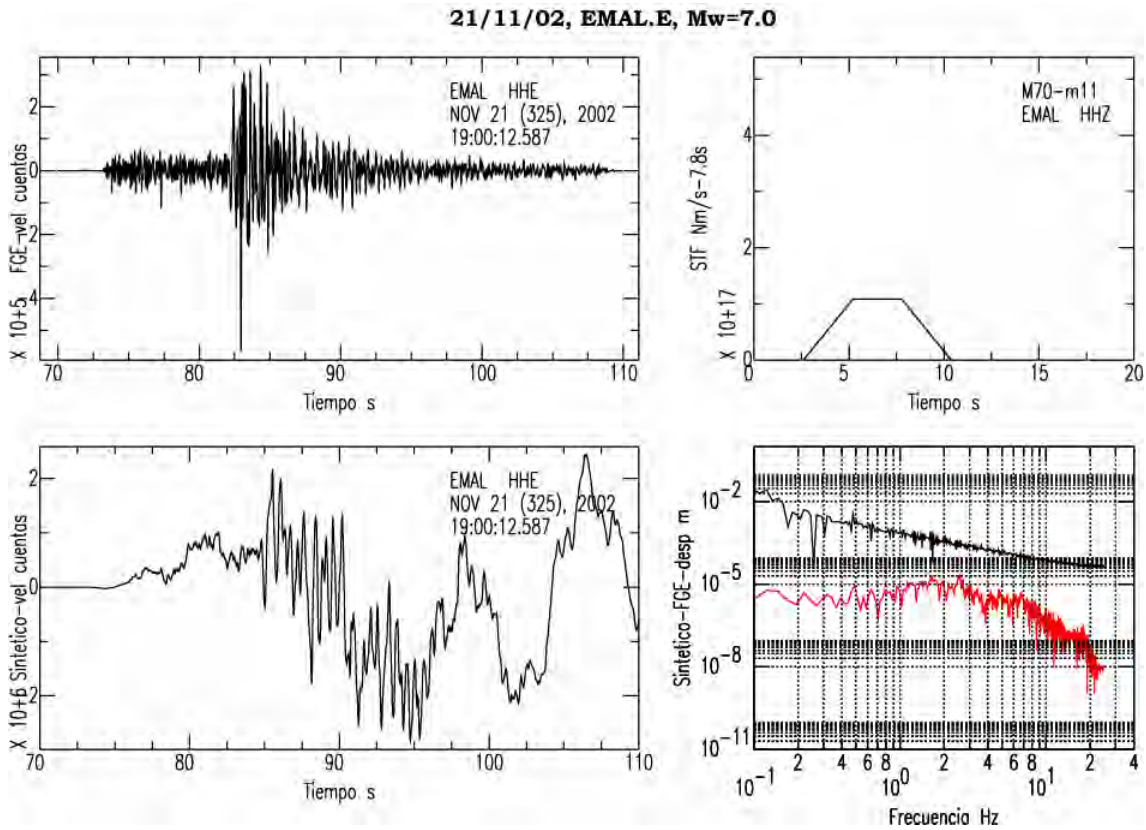
**21/11/02, EMAL.2, Mw=6.5**



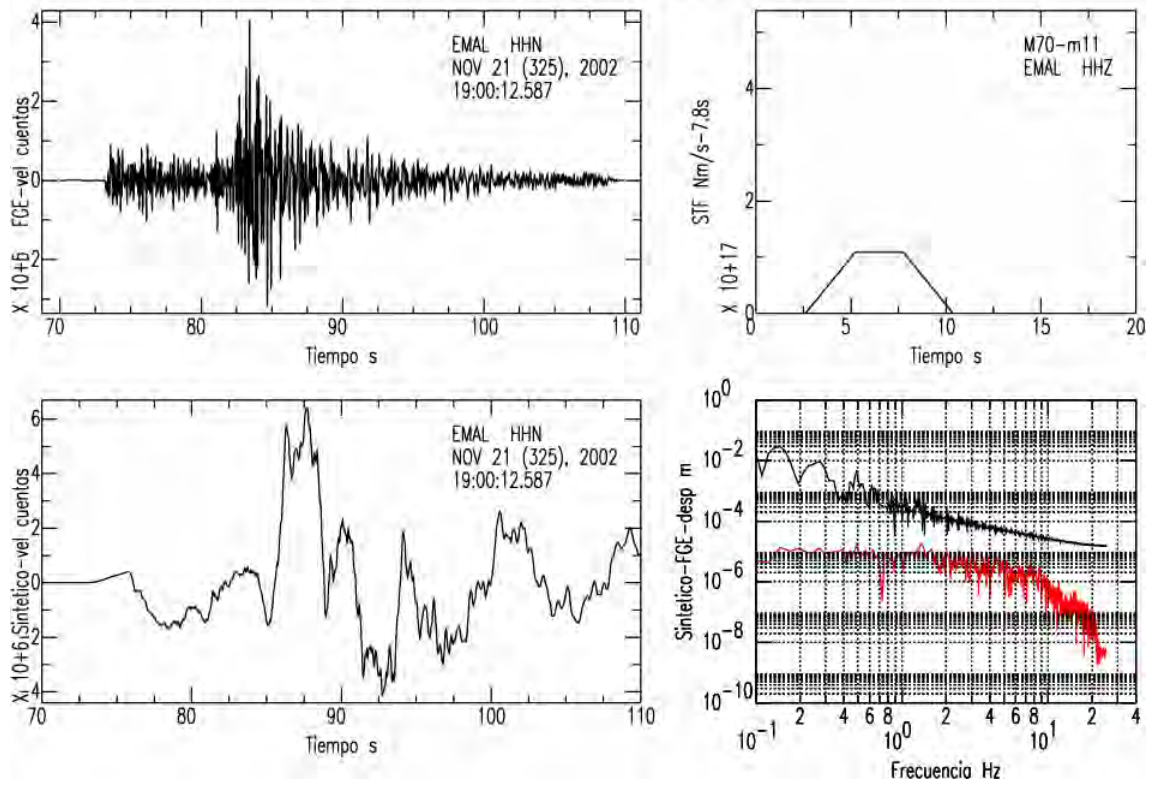
**21/11/02, EMAL.2, Mw=6.5**



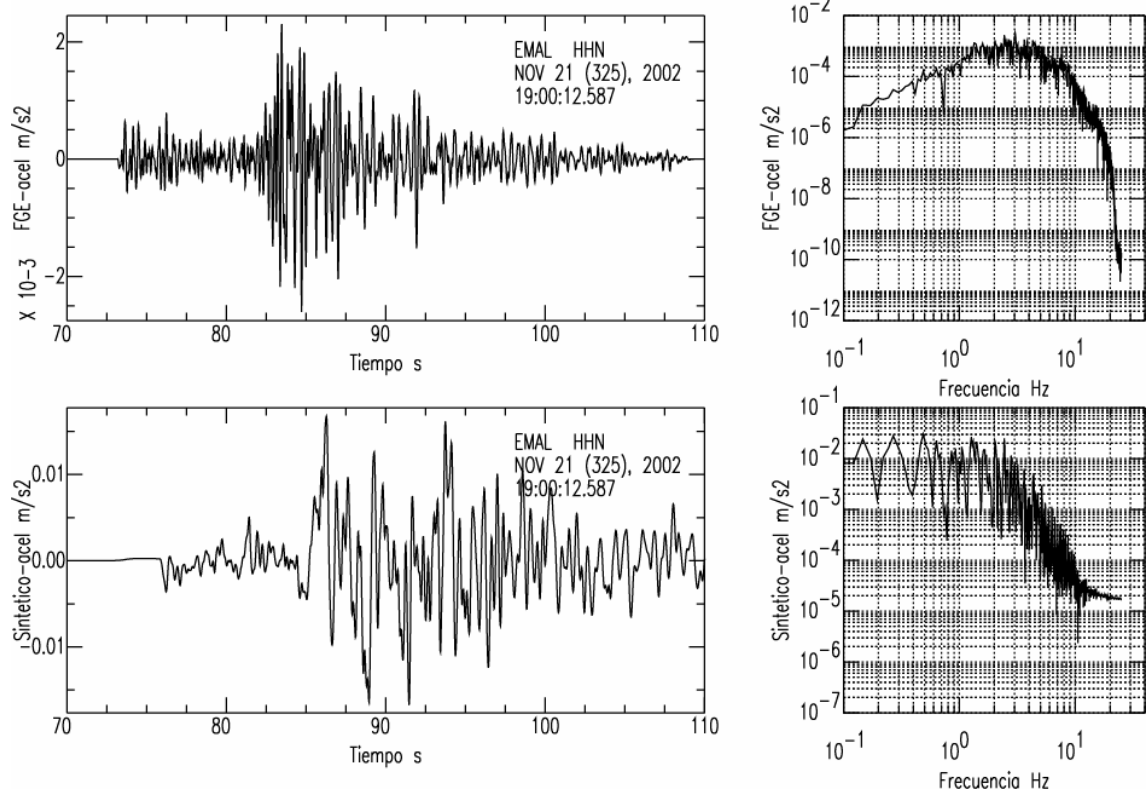


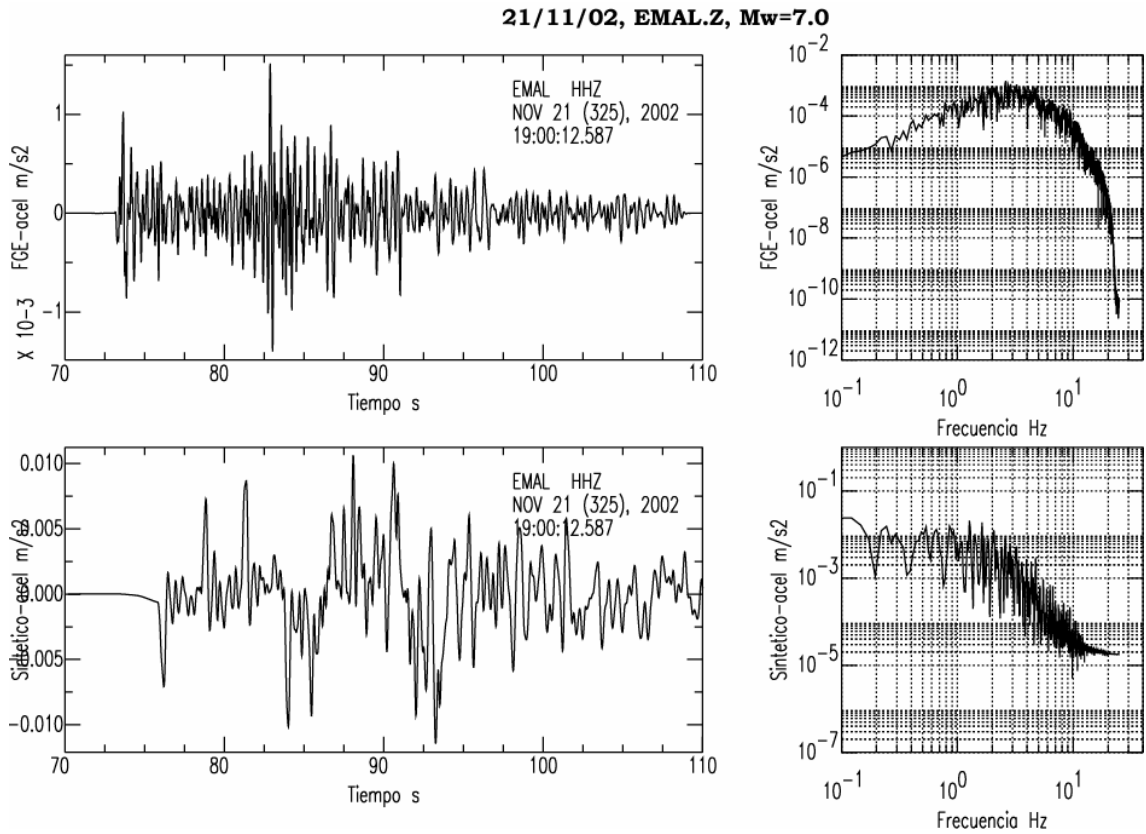
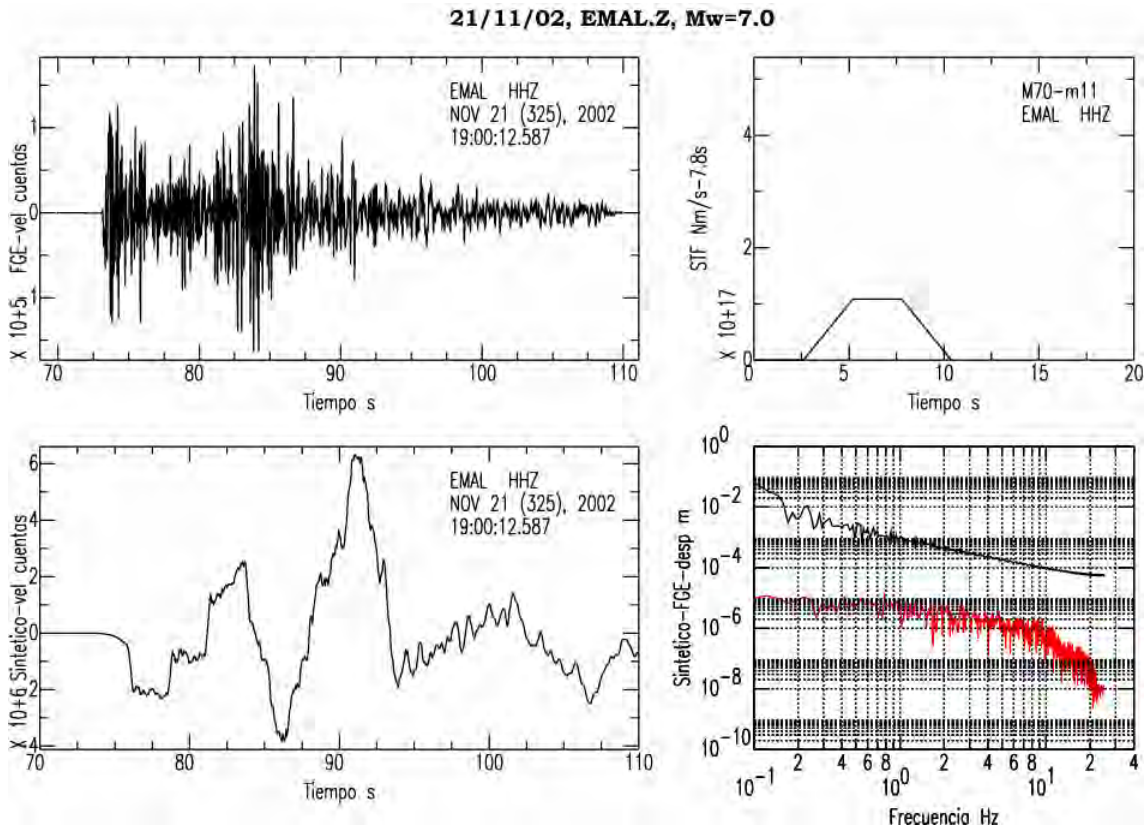


**21/11/02, EMAL.N, Mw=7.0**



**21/11/02, EMAL.N, Mw=7.0**

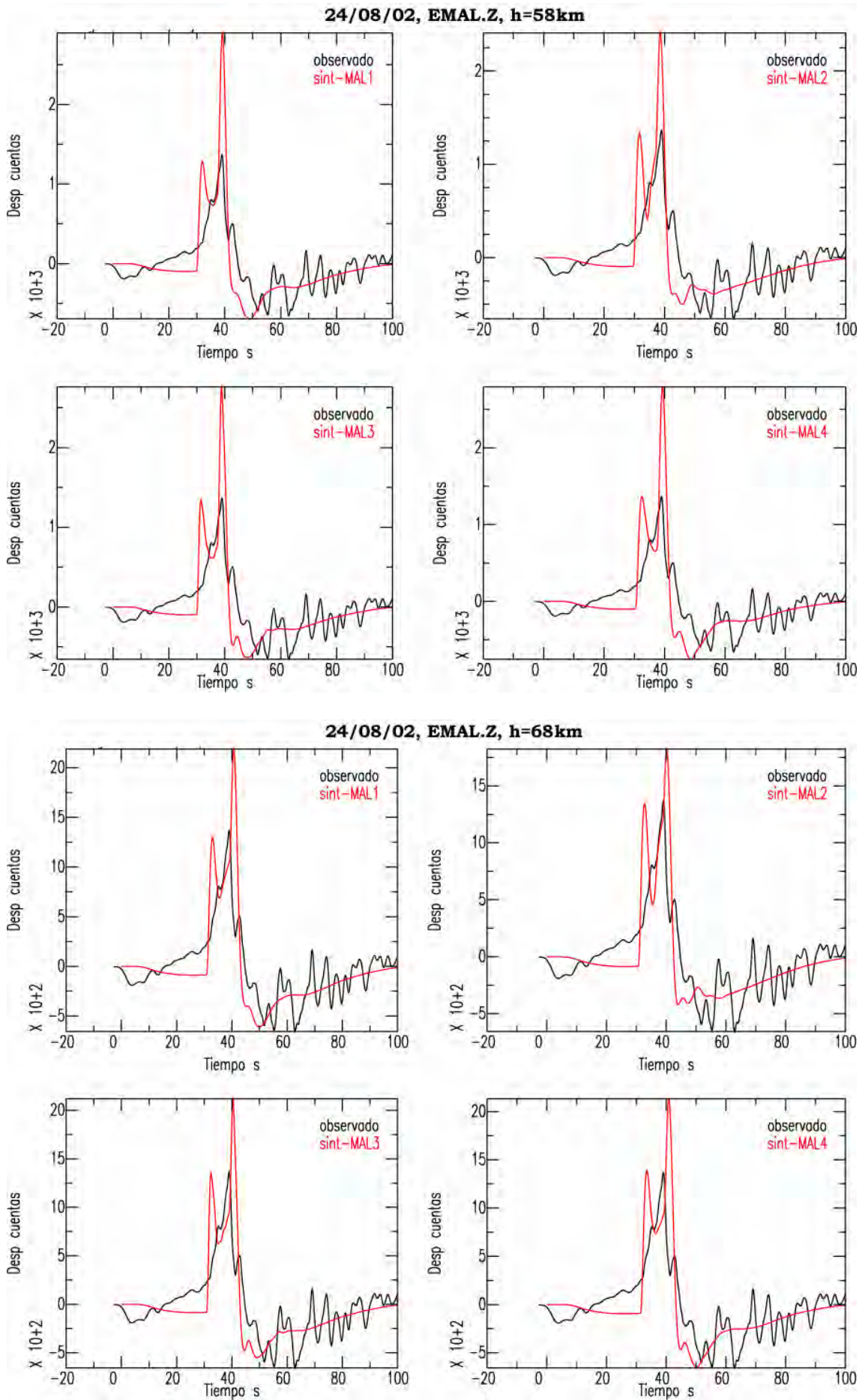




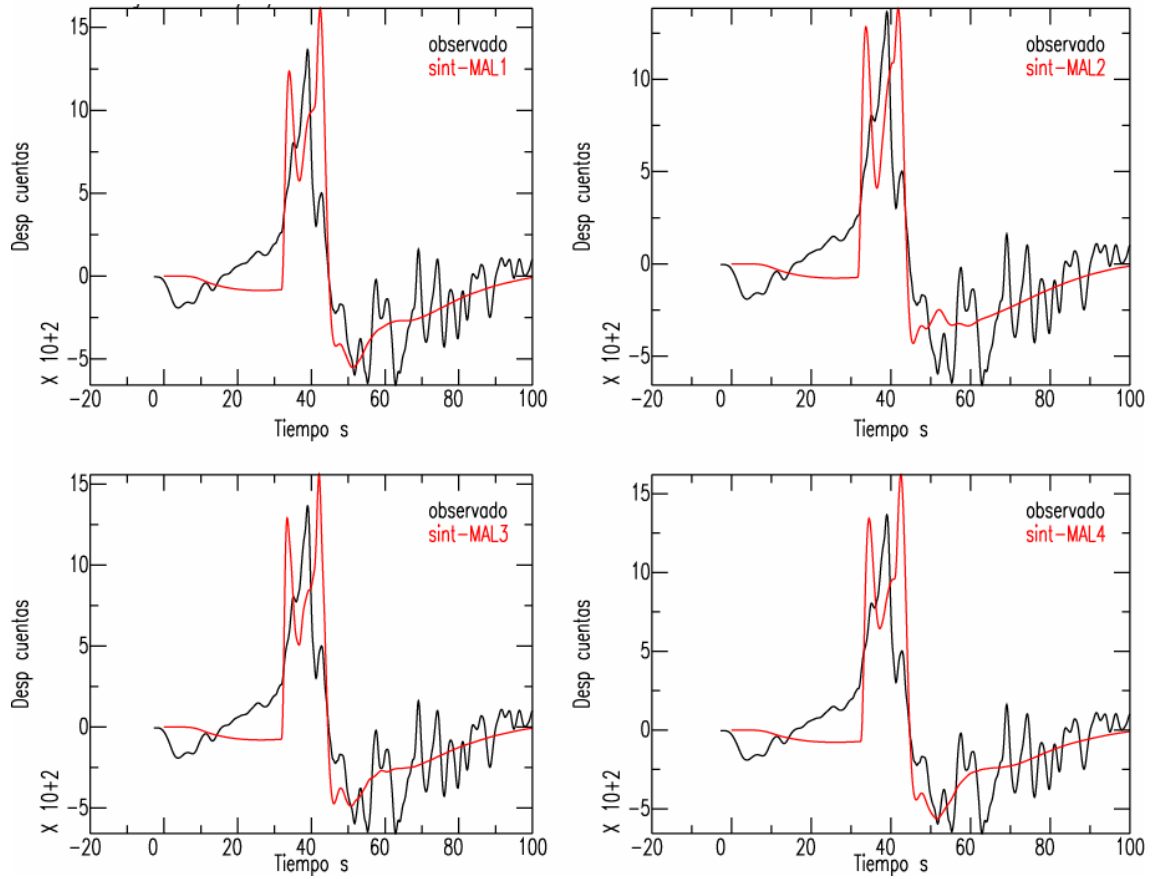
## **Anexo V. Método de la discretización del número de onda**

- a) Desplazamientos verticales observados (en negro), y teóricos (en rojo), para cuatro modelos de tierra distintos (MAL1, MAL2, MAL3 y MAL4), para los terremotos de 24/08/02 y 21/11/02 y profundidades 58, 68 y 78km y 81, 91 y 101km, respectivamente.
- b) Simulación de sismos de magnitudes  $M_w$  5.5, 6.5 y 7.0. La orientación de los planos de falla corresponde a la de los sismos de 24/08/02 ( $h=60\text{km}$ ), y 21/11/02 ( $h=90\text{km}$ ). Se utiliza el modelo de tierra MAL4 y se muestran los registros de aceleración en sus tres componentes.

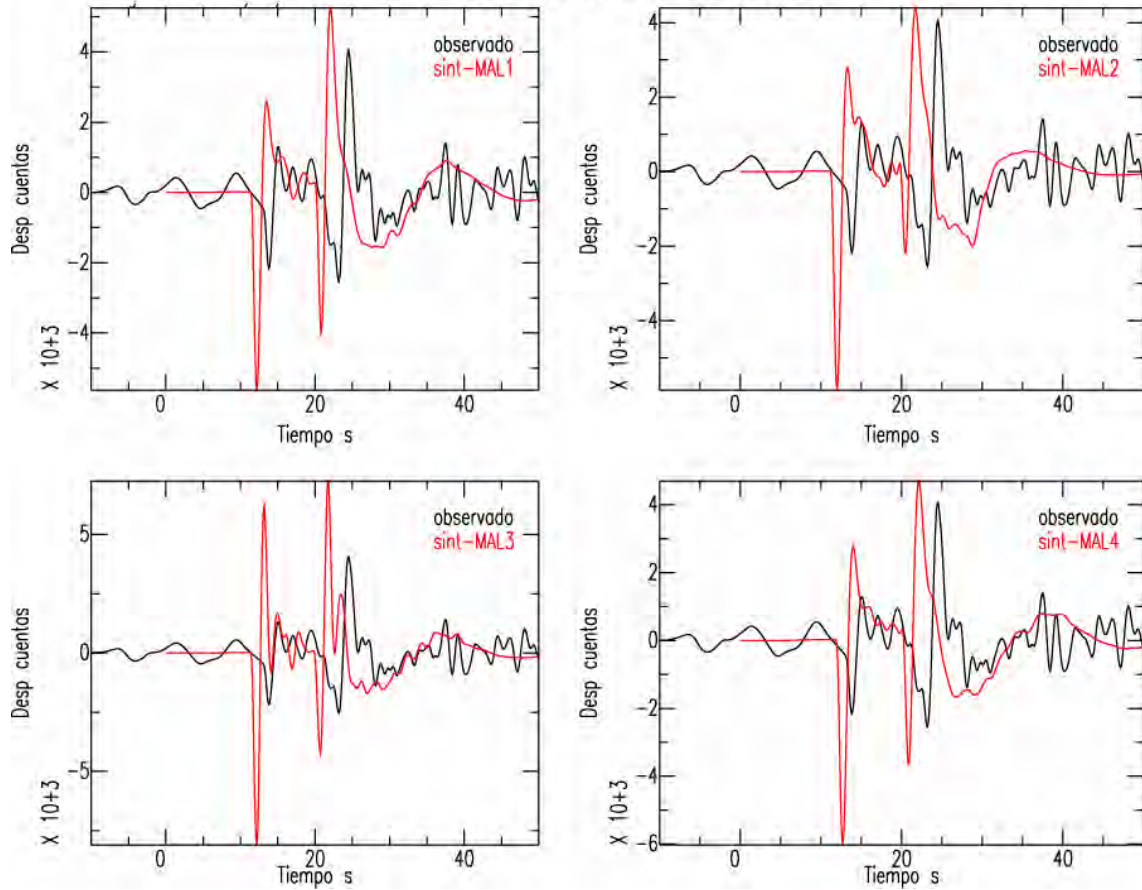


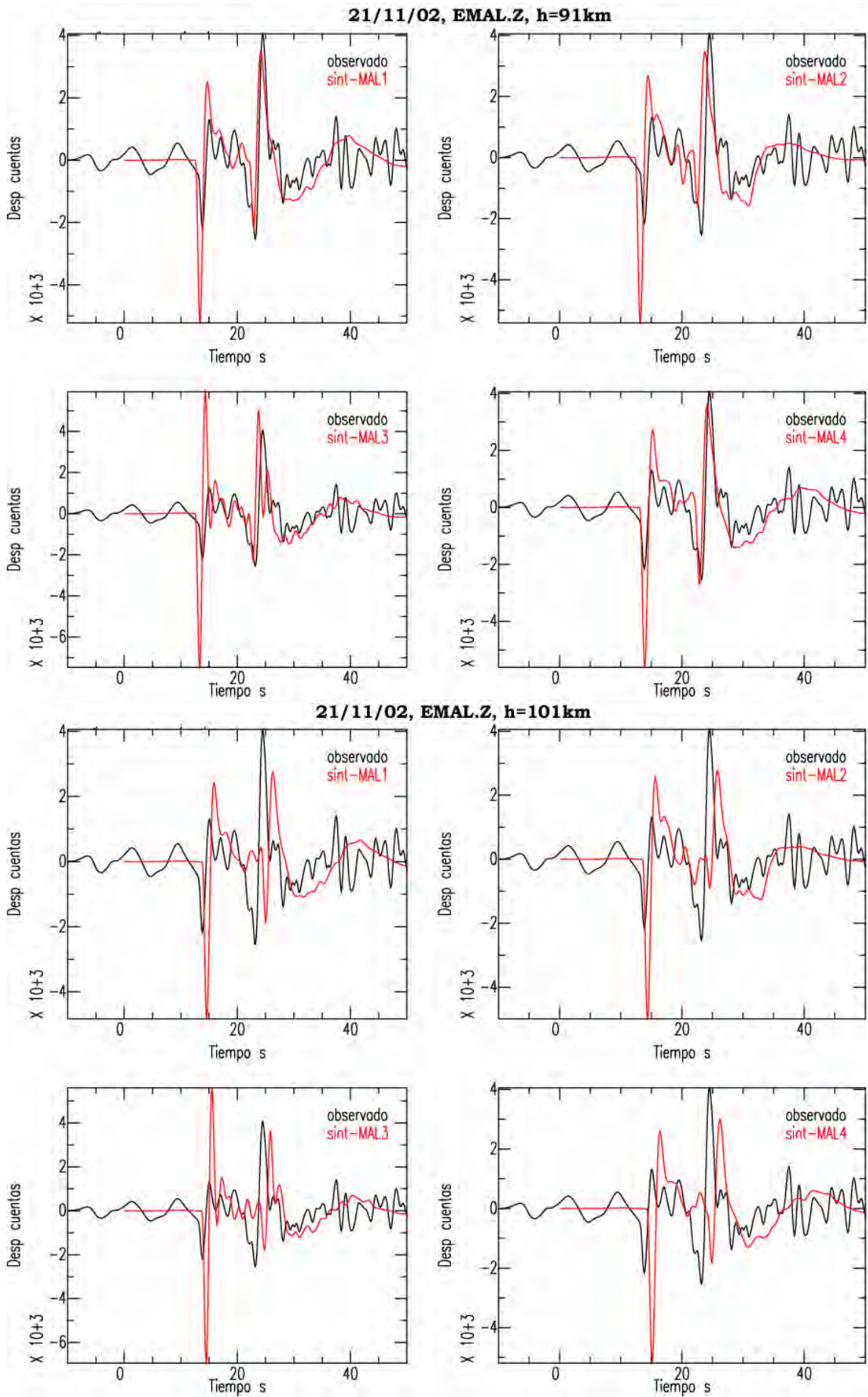


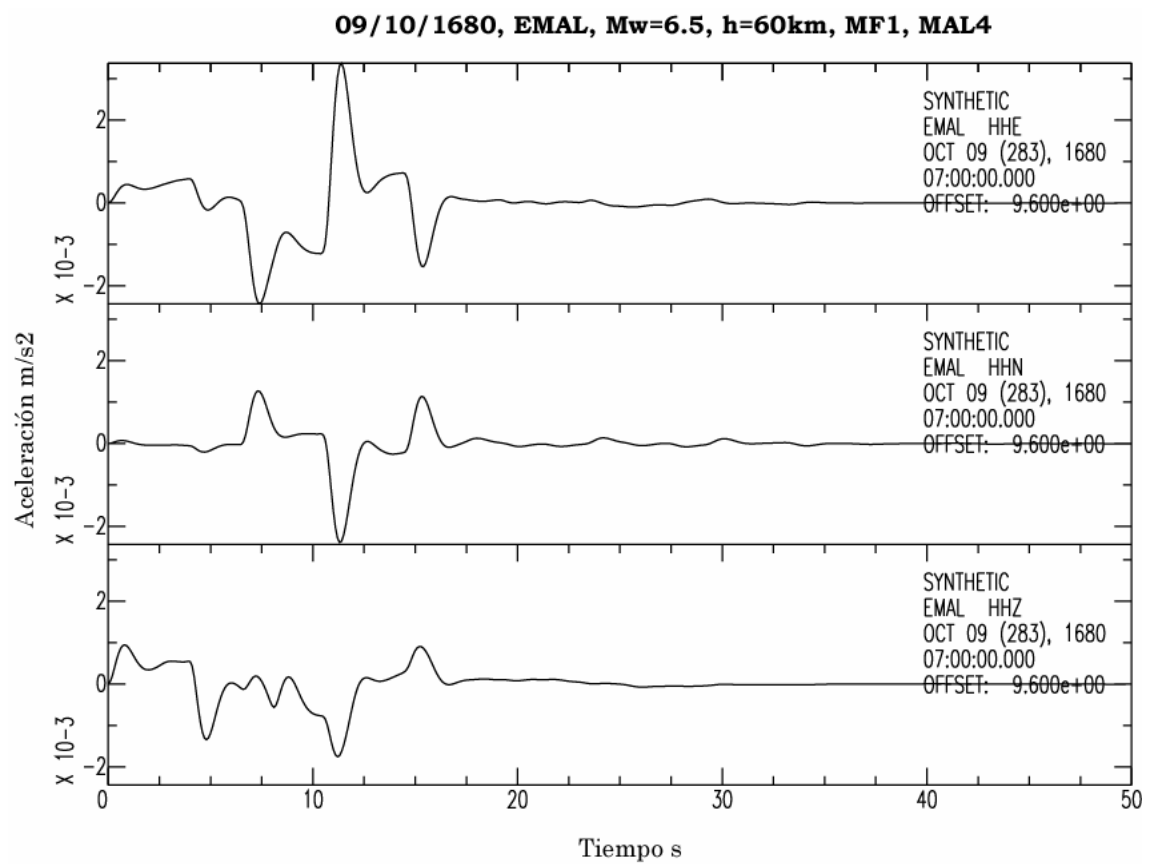
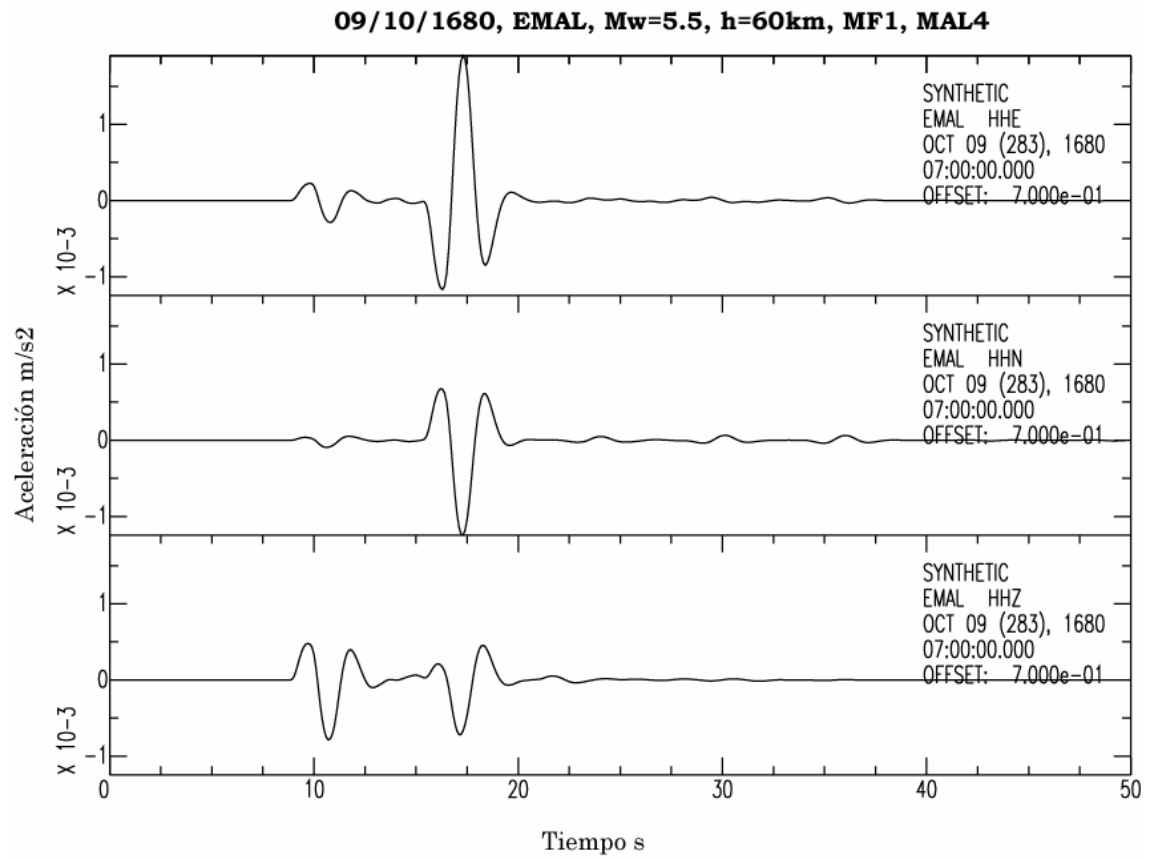
**24/08/02, EMAL.Z, h=78km**



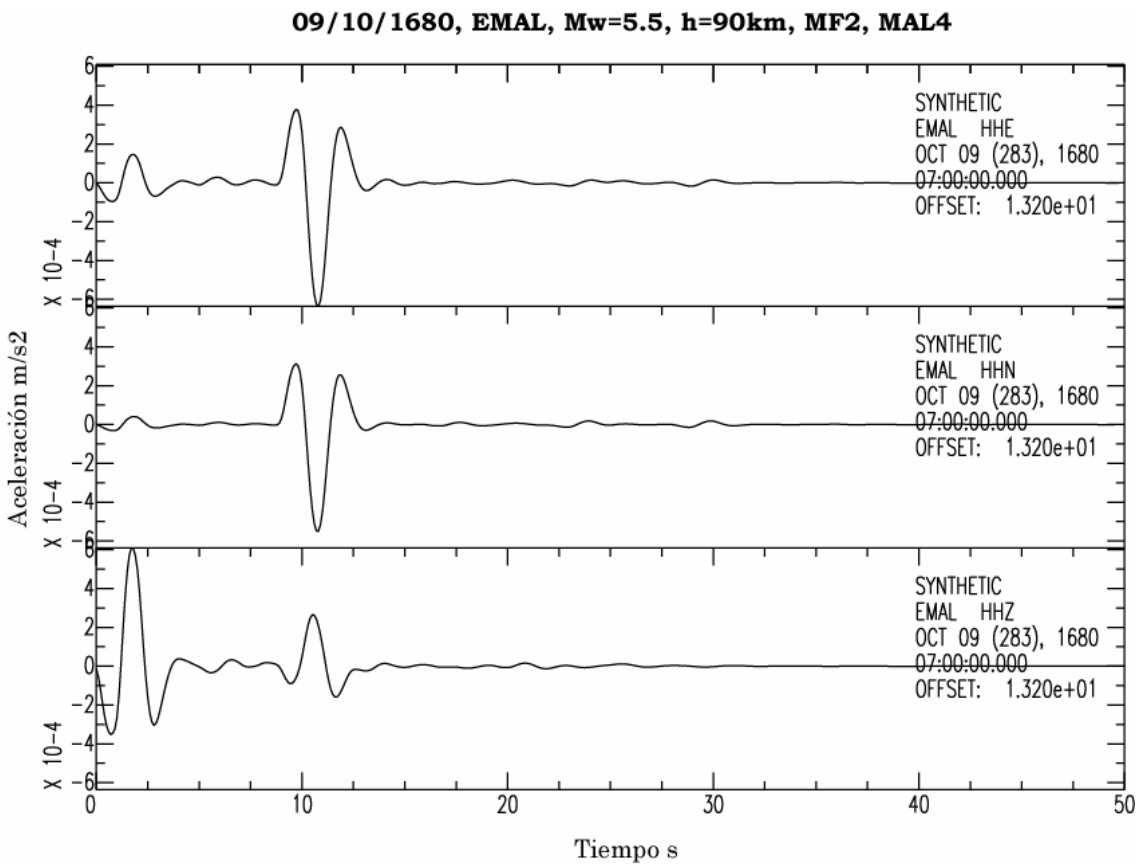
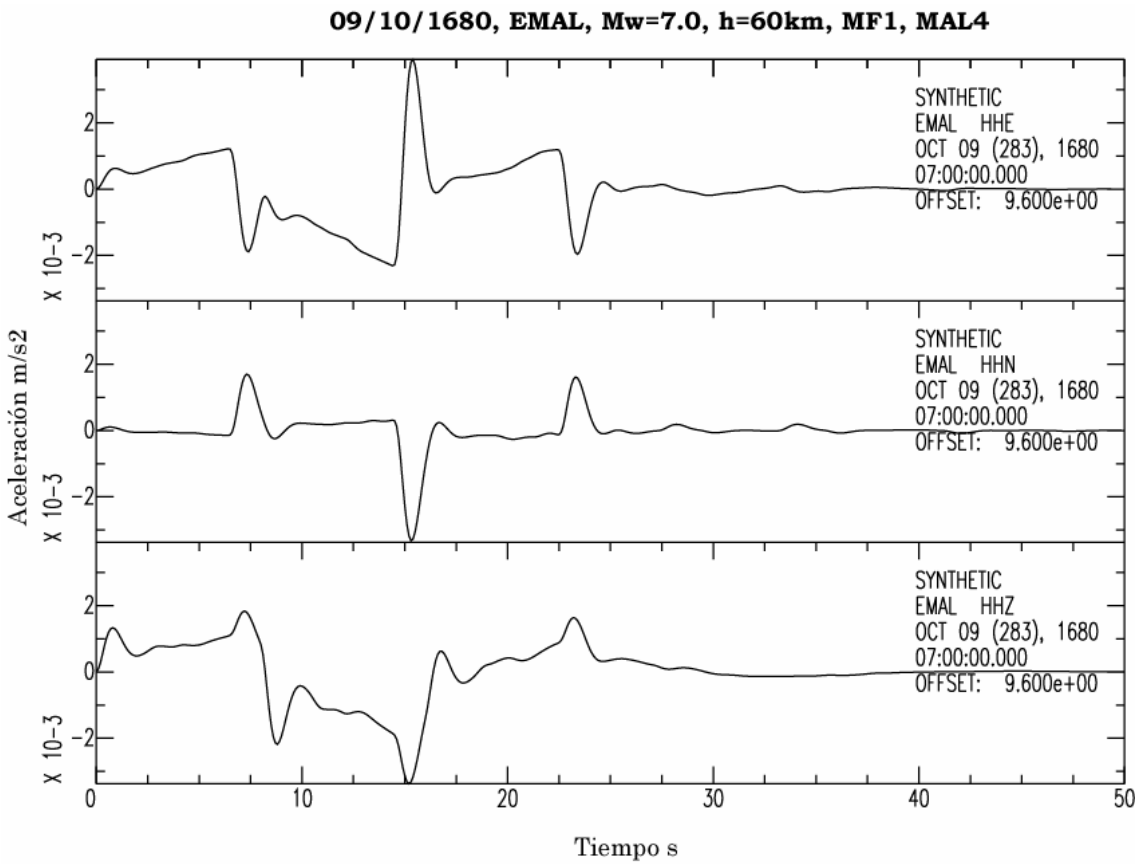
**21/11/02, EMAL.Z, h=81km**

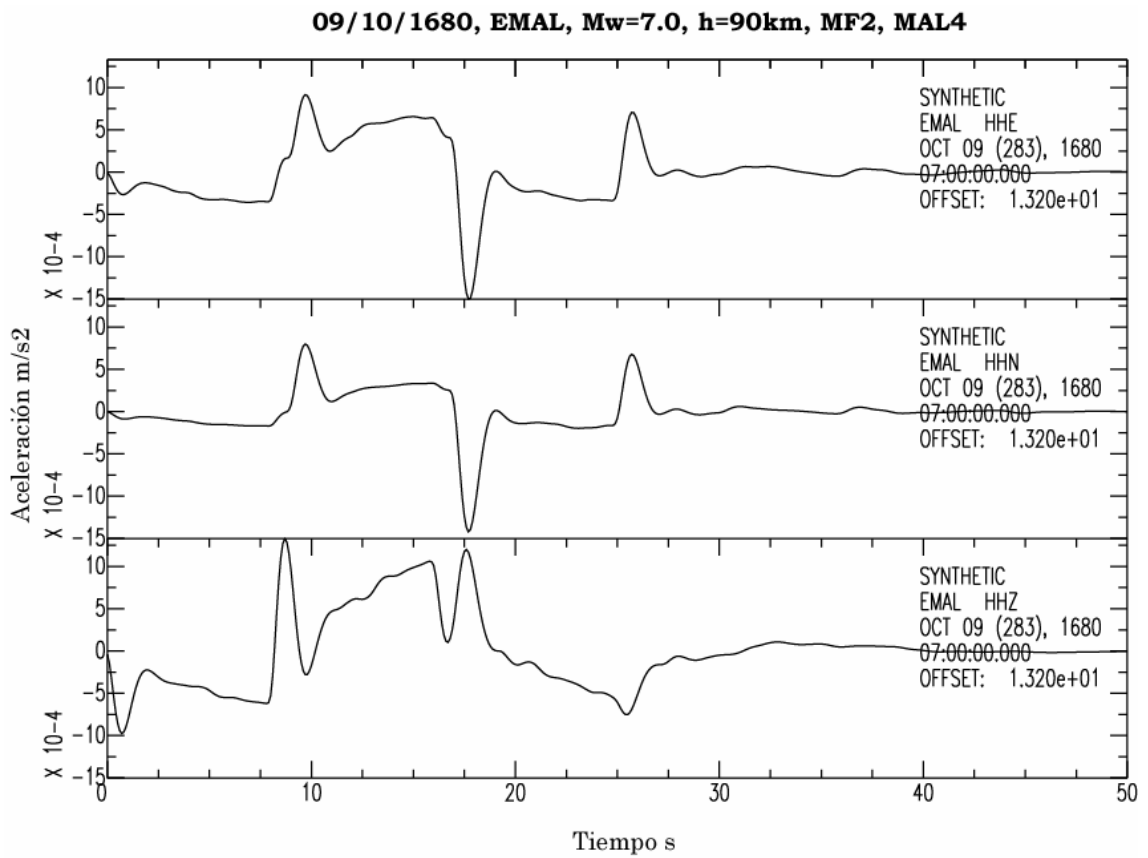
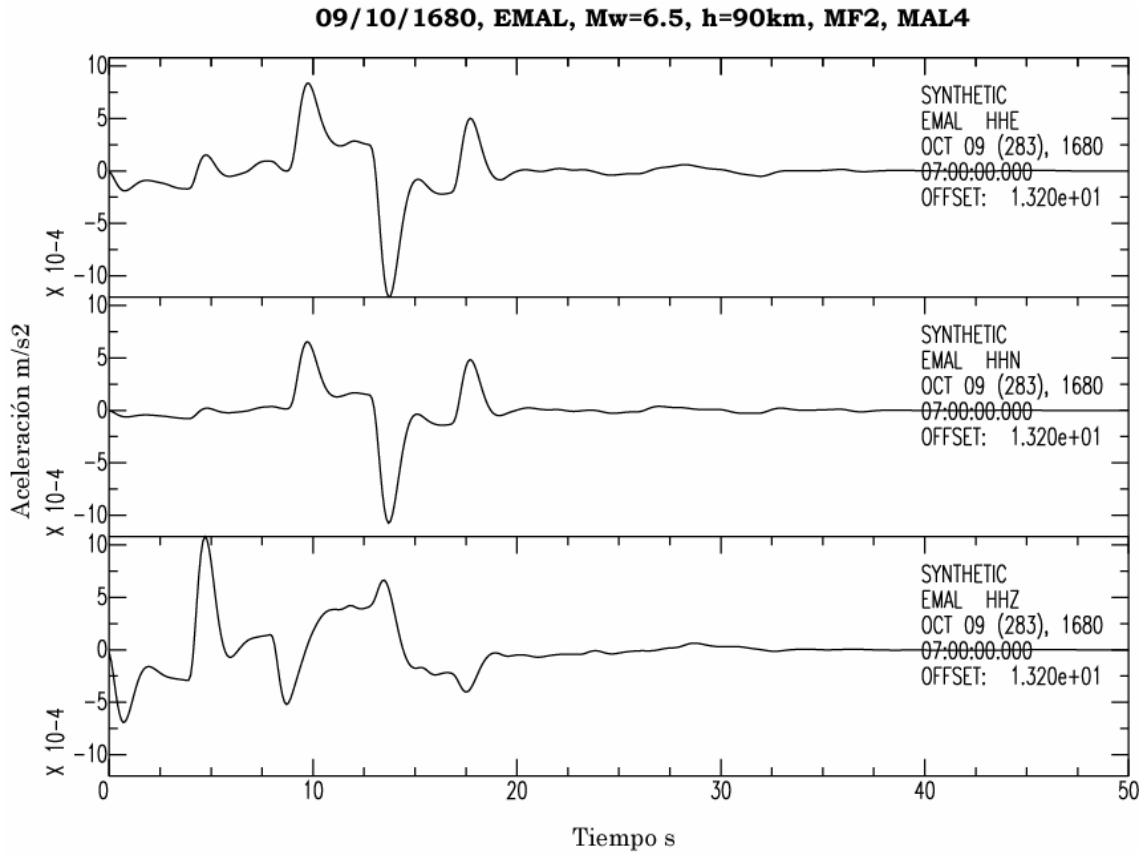














## Anexo VI. Correctores del índice de vulnerabilidad para cada tipología

### Modificadores generales del índice de vulnerabilidad

Modificadores generales de $V_I$		$\Delta V_I$
Estado de mantenimiento	malo	+0.04
	intermedio	0
	bueno	-0.04
Nivel de daño	severo	+0.04
	ligero	+0.02
	ningún daño	0
Transformaciones estructurales	sí	+0.02
	no	0
Intervenciones recientes	sí	-0.02
	no	+0.02
Calidad de la mampostería	mala	+0.05
	bueno	0
Morfología de la región	colina/monte	+0.04
	suelo en pendiente	+0.02
	suelo llano	0

### Modificadores específicos del índice de vulnerabilidad: palacios

Modificadores específicos de $V_I$			$\Delta V_I$
<b>PALACIOS/ EDIFICIOS</b>	Regularidad en planta	sí	-0.02
		no	+0.02
	Regularidad en sección	sí	0
		no	+0.02
	Posición	incluido dentro de un grupo de edificios	-0.02
		esquina/al final de una hilera	+0.04
		aislado	0
	Número de plantas	bajo (1-2)	-0.02
		medio (3-5)	0
		alto (>5)	+0.04
	Claustros/salones	sí	+0.01
		no	0

## Modificadores específicos del índice de vulnerabilidad: monasterios

Modificadores específicos de $V_I$			$\Delta V_I$
<b>MONASTERIOS/ CONVENTOS</b>	Regularidad en planta	sí	-0.02
		no	+0.02
	Regularidad en sección	sí	0
		no	+0.02
	Posición	incluido dentro de un grupo de edificios	-0.02
		esquina/al final de una hilera	+0.04
		aislado	0
	Número de plantas	bajo (1-2)	-0.02
		medio (3-5)	0
		alto (>5)	+0.04
	Claustros/salones	sí	+0.01
		no	0

## Modificadores específicos del índice de vulnerabilidad: castillos

Modificadores específicos de $V_I$			$\Delta V_I$
<b>CASTILLOS</b>	Regularidad en planta	sí	-0.02
		no	+0.02
	Regularidad en la sección: ¿elementos altos/esbeltos?	sí	+0.04
		no	0
	Altura	alta	+0.04
		media	0
		baja	-0.02

## Modificadores específicos del índice de vulnerabilidad: estatuas y fuentes

Modificadores específicos de $V_I$			$\Delta V_I$
<b>ESTATUAS/ FUENTES</b>	Altura	bajo (<3m)	0
		alto (>3m)	+0.02
	Elementos esbeltos	sí	+0.04
		no	0
	Elementos pesados en altura	sí	+0.04
		no	0

Modificadores específicos del índice de vulnerabilidad: iglesias

Modificadores específicos de $V_I$			$\Delta V_I$
<b>IGLESIAS</b>	Regularidad en planta: número de naves	central	-0.02
		una	0
		tres	+0.02
	Regularidad en sección: ¿fachada que sobresale?, ¿elementos altos?	sí	+0.04
		no	0
	Posición	incluido dentro de un grupo de edificios	-0.02
		adosado a otros edificios	+0.02
		aislado	0
	Cúpulas/arcos	sí	+0.04
		no	0
	Altura de las paredes laterales	baja (< 6m)	-0.02
		media (6-12m)	0
		alta (> 12m)	+0.04

Modificadores específicos del índice de vulnerabilidad: ermitas

Modificadores específicos de $V_I$			$\Delta V_I$
<b>ERMITAS/ ORATORIOS/ CAPILLAS</b>	Regularidad en planta: número de naves	central	-0.02
		una	0
		tres	+0.02
	Regularidad en sección: ¿fachada que sobresale?, ¿elementos altos?	sí	+0.04
		no	0
	Posición	incluido dentro de un grupo de edificios	-0.02
		esquina/al final de una hilera	+0.02
		aislado	0
	Cúpulas/arcos	sí	+0.04
		no	0
	Altura de las paredes laterales	baja (<4m)	-0.02
		media (4-8m)	0
		alta (>8m)	+0.04

## Modificadores específicos del índice de vulnerabilidad: teatros

Modificadores específicos de $V_I$			$\Delta V_I$
<b>TEATROS</b>	Regularidad en planta	sí	-0.02
		no	+0.02
	Regularidad en sección: ¿elementos altos/esbeltos?	sí	+0.02
		no	0
	Posición	incluido dentro de un grupo de edificios	-0.02
		esquina/al final de una hilera	+0.04
		aislado	0
	Altura	baja	-0.02
		media	0
		alta	+0.06

## Modificadores específicos del índice de vulnerabilidad: torres

Modificadores específicos de $V_I$			$\Delta V_I$
<b>TORRES/ CAMPANARIOS</b>	Regularidad en la planta: forma de la planta	cuadrada	0
		rectangular	+0.02
		poligonal	0
		circular	0
	Posición	incluido dentro de un grupo de edificios	+0.04
		unido por dos lados a otros edificios (tipo esquina)	+0.02
		unido por un lado a otros edificios (como al final de una hilera)	0
		aislado	-0.02
	Altura total	baja (<10m)	-0.02
		media (10-20m)	0
		alta (>20m)	+0.02
	Altura del elemento que sobresale	baja (<10m)	0
		alta (>10m)	+0.02
	Lado mínimo	corto (<2m)	+0.01
		largo (>2m)	0
	¿Varillas de acero?	sí	-0.04
		no	+0.04

Modificadores específicos del índice de vulnerabilidad: puentes

Modificadores específicos de $V_I$			$\Delta V_I$
<b>PUNTES</b>	Longitud	corto (<10m)	-0.02
		medio (10-50m)	0
		largo (>50m)	+0.04
	Tipología de los arcos	superficial	+0.02
		circular	0
		profundo/ojival	+0.02

Modificadores específicos del índice de vulnerabilidad: muros

Modificadores específicos de $V_I$			$\Delta V_I$
<b>PAREDES/MUROS</b>	Altura	bajo (<10m)	0
		alto (>10m)	+0.04
	Contrafuertes	sí	-0.04
		no	0

Modificadores específicos del índice de vulnerabilidad: arcos del triunfo

Modificadores específicos de $V_I$			$\Delta V_I$
<b>ARCOS DEL TRIUNFO</b>	Posición	aislado	0
		incluido	-0.02
	Anchura del arco	corto (<6m)	0
		largo (>6m)	+0.02
	Altura	bajo (<12m)	0
		alto (>12m)	+0.02

Modificadores específicos del índice de vulnerabilidad: obeliscos

Modificadores específicos de $V_I$			$\Delta V_I$
<b>OBELISCOS</b>	Altura	bajo (<10m)	0
		alto (>10m)	+0.02
	Elementos esbeltos	sí	+0.02
		no	0
	Elementos pesados en altura	sí	+0.04
		no	0





**Anexo VII. Índices de vulnerabilidad para los monumentos de Málaga**

## Modificadores del índice de vulnerabilidad: iglesias (1)

Parámetros	Monumento	Carmelitas Descalzos	Santo Domingo	San Juan	San Pedro en los Percheles	Clérigos Menores (*)	Capuchinos
	<b>Tipología</b>	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia
<b>Modificadores generales de <math>V_i</math></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	medio	medio	medio	medio	---	medio
	<b>Nivel de daño</b>	severo	severo	severo	severo	---	severo
	<b>Transformaciones estructurales</b>	sí	sí	sí	no	---	no
	<b>Intervenciones recientes</b>	no	no	sí	sí	---	no
	<b>Calidad de la mampostería</b>	buena	buena	buena	buena	---	mala
	<b>Morfología de la región</b>	llano	llano	llano	llano	---	llano
<b>Modificadores particulares de <math>V_i</math></b>	<b>Regularidad en planta</b>	tres	central	central	una	---	central
	<b>Regularidad en sección</b>	sí	sí	sí	sí	---	sí
	<b>Posición</b>	adosado	adosado	adosado	aislado	---	adosado
	<b>Cúpulas/arcos</b>	sí	sí	sí	sí	---	sí
	<b>Altura de las paredes laterales</b>	medio	medio	medio	alto	---	medio

## Modificadores del índice de vulnerabilidad: iglesias (2)

Parámetros	Monumento	Santos Mártires	San Pablo (*)	Compañía de Jesús	Ntra. Sra. de la Victoria (*)	Sagrario	Catedral
	<b>Tipología</b>	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia
<b>Modificadores generales de <math>V_i</math></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	medio	---	medio	---	medio	bueno
	<b>Nivel de daño</b>	severo	---	ligero	---	ligero	ligero
	<b>Transformaciones estructurales</b>	sí	---	sí	---	sí	no
	<b>Intervenciones recientes</b>	sí	---	sí	---	sí	no
	<b>Calidad de la mampostería</b>	buena	---	mala	---	buena	buena
	<b>Morfología de la región</b>	llano	---	llano	---	llano	llano
<b>Modificadores particulares de <math>V_i</math></b>	<b>Regularidad en planta</b>	central	---	central	---	una	central
	<b>Regularidad en sección</b>	sí	---	sí	---	no	sí
	<b>Posición</b>	adosado	---	adosado	---	aislado	aislado
	<b>Cúpulas/arcos</b>	sí	---	sí	---	no	sí
	<b>Altura de las paredes laterales</b>	medio	---	alto	---	medio	alto

Valores de los modificadores del índice de vulnerabilidad: iglesias (1)

Parámetros	Monumento	Carmelitas Descalzos	Santo Domingo	San Juan	San Pedro en los Percheles	Clérigos Menores (*)	Capuchinos
	<b>Tipología</b>	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia
<b>V<sub>i</sub> de las tipologías</b>	<b>V<sub>i</sub> inferior</b>	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
	<b>V<sub>i</sub> medio</b>	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
	<b>V<sub>i</sub> superior</b>	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
	<b>φ</b>	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
<b>Modificadores generales de V<sub>i</sub></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	---	0.00
	<b>Nivel de daño</b>	0.04	0.04	0.04	0.04	---	0.04
	<b>Transformaciones estructurales</b>	0.02	0.02	0.02	0.00	---	0.00
	<b>Intervenciones recientes</b>	0.02	0.02	-0.02	-0.02	---	0.02
	<b>Calidad de la mampostería</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	---	0.05
	<b>Morfología de la región</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	---	0.00
	<b>Corrección V<sub>i</sub> general</b>	0.08	0.08	0.04	0.02	---	0.11
<b>Modificadores particulares de V<sub>i</sub></b>	<b>Regularidad en planta</b>	0.02	-0.02	-0.02	0.00	---	-0.02
	<b>Regularidad en sección</b>	0.04	0.04	0.04	0.04	---	0.04
	<b>Posición</b>	0.02	0.02	0.02	0.00	---	0.02
	<b>Cúpulas/arcos</b>	0.04	0.04	0.04	0.04	---	0.04
	<b>Altura de las paredes laterales</b>	0.00	0.00	0.00	0.04	---	0.00
	<b>Corrección V<sub>i</sub> iglesias</b>	0.12	0.08	0.08	0.12	---	0.08
<b>Valores finales de V<sub>i</sub></b>	<b>Corrección V<sub>i</sub> total</b>	<b>0.20</b>	<b>0.16</b>	<b>0.12</b>	<b>0.14</b>	<b>---</b>	<b>0.19</b>
	<b>V<sub>i</sub> final inferior</b>	<b>0.97</b>	<b>0.93</b>	<b>0.89</b>	<b>0.91</b>	<b>0.77</b>	<b>0.96</b>
	<b>V<sub>i</sub> final medio</b>	<b>1.09</b>	<b>1.05</b>	<b>1.01</b>	<b>1.03</b>	<b>0.89</b>	<b>1.08</b>
	<b>V<sub>i</sub> final superior</b>	<b>1.46</b>	<b>1.42</b>	<b>1.38</b>	<b>1.40</b>	<b>1.26</b>	<b>1.45</b>

Valores de los modificadores del índice de vulnerabilidad: iglesias (2)

Parámetros	Monumento	Santos Mártires	San Pablo (*)	Compañía de Jesús	Ntra. Sra. de la Victoria (*)	Sagrario	Catedral
	<b>Tipología</b>	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia
<b>V<sub>i</sub> de las tipologías</b>	<b>V<sub>i</sub> inferior</b>	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
	<b>V<sub>i</sub> medio</b>	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
	<b>V<sub>i</sub> superior</b>	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
	<b>φ</b>	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
<b>Modificadores generales de V<sub>i</sub></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	0.00	---	0.00	---	0.00	-0.04
	<b>Nivel de daño</b>	0.04	---	0.02	---	0.02	0.02
	<b>Transformaciones estructurales</b>	0.02	---	0.02	---	0.02	0.00
	<b>Intervenciones recientes</b>	-0.02	---	-0.02	---	-0.02	0.02
	<b>Calidad de la mampostería</b>	0.00	---	0.05	---	0.00	0.00
	<b>Morfología de la región</b>	0.00	---	0.00	---	0.00	0.00
	<b>Corrección V<sub>i</sub> general</b>	0.04	---	0.07	---	0.02	0.00
<b>Modificadores particulares de V<sub>i</sub></b>	<b>Regularidad en planta</b>	-0.02	---	-0.02	---	0.00	-0.02
	<b>Regularidad en sección</b>	0.04	---	0.04	---	0.00	0.04
	<b>Posición</b>	0.02	---	0.02	---	0.00	0.00
	<b>Cúpulas/arcos</b>	0.04	---	0.04	---	0.00	0.04
	<b>Altura de las paredes laterales</b>	0.00	---	0.04	---	0.00	0.04
	<b>Corrección V<sub>i</sub> iglesias</b>	0.08	---	0.12	---	0.00	0.10
	<b>Corrección V<sub>i</sub> total</b>	<b>0.12</b>	<b>---</b>	<b>0.19</b>	<b>---</b>	<b>0.02</b>	<b>0.10</b>
<b>Valores finales de V<sub>i</sub></b>	<b>V<sub>i</sub> final inferior</b>	<b>0.89</b>	<b>0.77</b>	<b>0.96</b>	<b>0.77</b>	<b>0.79</b>	<b>0.87</b>
	<b>V<sub>i</sub> final medio</b>	<b>1.01</b>	<b>0.89</b>	<b>1.08</b>	<b>0.89</b>	<b>0.91</b>	<b>0.99</b>
	<b>V<sub>i</sub> final superior</b>	<b>1.38</b>	<b>1.26</b>	<b>1.45</b>	<b>1.26</b>	<b>1.28</b>	<b>1.36</b>

Modificadores del índice de vulnerabilidad: castillos

Parámetros	Monumento	Gibralfaro	Alcazaba
	Tipología	castillo	castillo
Modificadores generales de $V_i$	Estado de mantenimiento	medio	medio
	Nivel de daño	severo	severo
	Transformaciones estructurales	sí	sí
	Intervenciones recientes	sí	sí
	Calidad de la mampostería	mala	mala
	Morfología de la región	colina	colina
Modificadores particulares de $V_i$	Regularidad en planta	no	no
	Regularidad en sección	sí	sí
	Altura	medio	medio

Valores de los modificadores del índice de vulnerabilidad: castillos

Parámetros	Monumento	Gibralfaro	Alcazaba
	Tipología	castillo	castillo
$V_i$ de las tipologías	$V_i$ inferior	0.356	0.356
	$V_i$ medio	0.456	0.456
	$V_i$ superior	0.766	0.766
	$\phi$	2.3	2.3
Modificadores generales de $V_i$	Estado de mantenimiento	0.00	0.00
	Nivel de daño	0.04	0.04
	Transformaciones estructurales	0.02	0.02
	Intervenciones recientes	-0.02	-0.02
	Calidad de la mampostería	0.05	0.05
	Morfología de la región	0.04	0.04
	Corrección $V_i$ general	0.13	0.13
Modificadores particulares de $V_i$	Regularidad en planta	0.02	0.02
	Regularidad en sección	0.04	0.04
	Altura	0.00	0.00
	Corrección $V_i$ castillos	0.06	0.06
Valores finales de $V_i$	Corrección $V_i$ total	<b>0.19</b>	<b>0.19</b>
	$V_i$ final inferior	<b>0.546</b>	<b>0.546</b>
	$V_i$ final medio	<b>0.646</b>	<b>0.646</b>
	$V_i$ final superior	<b>0.956</b>	<b>0.956</b>

Modificadores del índice de vulnerabilidad: palacios

Parámetros	Monumento	Casa Episcopal	Colegio Seminario
	Tipología	palacio	palacio
Modificadores generales de $V_i$	Estado de mantenimiento	bueno	medio
	Nivel de daño	ligero	ligero
	Transformaciones estructurales	sí	no
	Intervenciones recientes	sí	sí
	Calidad de la mampostería	bueno	mala
	Morfología de la región	llano	llano
Modificadores particulares de $V_i$	Regularidad en planta	no	sí
	Regularidad en sección	sí	sí
	Posición	aislado	incluido
	Número de plantas	medio	medio
	Claustros/salones	sí	sí

Valores de los modificadores del índice de vulnerabilidad: palacios

Parámetros	Monumento	Casa Episcopal	Colegio Seminario
	Tipología	palacio	palacio
$V_i$ de las tipologías	$V_i$ inferior	0.496	0.496
	$V_i$ medio	0.616	0.616
	$V_i$ superior	0.956	0.956
	$\phi$	2.3	2.3
Modificadores generales de $V_i$	Estado de mantenimiento	-0.04	0.00
	Nivel de daño	0.02	0.02
	Transformaciones estructurales	0.02	0.00
	Intervenciones recientes	-0.02	-0.02
	Calidad de la mampostería	0.00	0.05
	Morfología de la región	0.00	0.00
	Corrección $V_i$ general	-0.02	0.05
Modificadores particulares de $V_i$	Regularidad en planta	0.02	-0.02
	Regularidad en sección	0.00	0.00
	Posición	0.00	-0.02
	Número de plantas	0.00	0.00
	Claustros/salones	0.01	0.01
	Corrección $V_i$ palacios	0.03	-0.03
Valores finales de $V_i$	Corrección $V_i$ total	<b>0.01</b>	<b>0.02</b>
	$V_i$ final inferior	<b>0.506</b>	<b>0.516</b>
	$V_i$ final medio	<b>0.626</b>	<b>0.636</b>
	$V_i$ final superior	<b>0.966</b>	<b>0.976</b>

Modificadores del índice de vulnerabilidad: monasterios

Parámetros	Monumento	Trinitarios Calzados	Recoletas Bernardas del Císter (*)	San Agustín
	<b>Tipología</b>	monasterio	monasterio	monasterio
<b>Modificadores generales de <math>V_i</math></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	bueno	---	bueno
	<b>Nivel de daño</b>	ligero	---	ligero
	<b>Transformaciones estructurales</b>	sí	---	no
	<b>Intervenciones recientes</b>	no	---	no
	<b>Calidad de la mampostería</b>	buena	---	buena
	<b>Morfología de la región</b>	llano	---	llano
<b>Modificadores particulares de <math>V_i</math></b>	<b>Regularidad en planta</b>	sí	---	sí
	<b>Regularidad en sección</b>	sí	---	no
	<b>Posición</b>	aislado	---	incluído
	<b>Número de plantas</b>	bajo	---	medio
	<b>Claustros/salones</b>	sí	---	sí

Valores de los modificadores del índice de vulnerabilidad: monasterios

Parámetros	Monumento	Trinitarios Calzados	Recoletas Bernardas del Císter (*)	San Agustín
	<b>Tipología</b>	monasterio	monasterio	monasterio
<b><math>V_i</math> de las tipologías</b>	<b><math>V_i</math> inferior</b>	0.616	0.616	0.616
	<b><math>V_i</math> medio</b>	0.736	0.736	0.736
	<b><math>V_i</math> superior</b>	1.076	1.076	1.076
	<b><math>\phi</math></b>	2.3	2.3	2.3
<b>Modificadores generales de <math>V_i</math></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	-0.04	---	-0.04
	<b>Nivel de daño</b>	0.02	---	0.02
	<b>Transformaciones estructurales</b>	0.02	---	0.00
	<b>Intervenciones recientes</b>	0.02	---	0.02
	<b>Calidad de la mampostería</b>	0.00	---	0.00
	<b>Morfología de la región</b>	0.00	---	0.00
	<b>Corrección <math>V_i</math> general</b>	0.02	---	0.00
<b>Modificadores particulares de <math>V_i</math></b>	<b>Regularidad en planta</b>	-0.02	---	-0.02
	<b>Regularidad en sección</b>	0.00	---	0.02
	<b>Posición</b>	0.00	---	-0.02
	<b>Número de plantas</b>	-0.02	---	0.00
	<b>Claustros/salones</b>	0.01	---	0.01
	<b>Corrección <math>V_i</math> monasterios</b>	-0.03	---	-0.01
	<b>Corrección <math>V_i</math> total</b>	<b>-0.01</b>	<b>---</b>	<b>-0.01</b>
<b>Valores finales de <math>V_i</math></b>	<b><math>V_i</math> final inferior</b>	<b>0.606</b>	<b>0.616</b>	<b>0.606</b>
	<b><math>V_i</math> final medio</b>	<b>0.726</b>	<b>0.736</b>	<b>0.726</b>
	<b><math>V_i</math> final superior</b>	<b>1.066</b>	<b>1.076</b>	<b>1.066</b>

(\*) No se utilizan correctores de  $V_i$





**Anexo VIII. Tablas de probabilidades de daño**

Probabilidades de daño a partir del índice de vulnerabilidad inferior

<b>Grado de daño (k)</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Monumento</b>						
Iglesia del convento de los Carmelitas Descalzos	0.002	0.020	0.108	0.287	0.381	0.202
Iglesia del convento de Santo Domingo Parroquia de San Juan	0.003	0.031	0.140	0.315	0.353	0.158
Iglesia de San Pedro en los Percheles	0.002	0.020	0.108	0.287	0.381	0.202
Iglesia del antiguo Colegio de los Clérigos Menores	0.004	0.038	0.157	0.325	0.336	0.139
Iglesia del convento de los Capuchinos	0.008	0.067	0.215	0.345	0.276	0.089
Iglesia del convento de los Capuchinos Parroquia de los Santos Mártires	0.002	0.023	0.116	0.294	0.375	0.191
Iglesia de San Pablo	0.002	0.020	0.108	0.287	0.381	0.202
Castillo de Gibralfaro	0.022	0.124	0.287	0.332	0.191	0.044
Alcazaba	0.498	0.372	0.111	0.017	0.001	0.000
Convento de los Ángeles Trinitarios Calzados	0.498	0.372	0.111	0.017	0.001	0.000
Iglesia del antiguo convento de la Compañía de Jesús	0.250	0.399	0.255	0.081	0.013	0.001
Iglesia del convento de Nuestra Señora de la Victoria	0.001	0.009	0.065	0.229	0.407	0.289
Convento de las Recoletas Bernardas del Císter	0.022	0.124	0.287	0.332	0.191	0.044
Parroquia de Sagrario	0.123	0.321	0.333	0.173	0.045	0.005
Casa Episcopal	0.083	0.268	0.345	0.223	0.072	0.009
Colegio Seminario	0.161	0.355	0.313	0.138	0.030	0.003
Convento de San Agustín	0.148	0.344	0.321	0.150	0.035	0.003
Catedral	0.389	0.404	0.168	0.035	0.004	0.000
	0.041	0.183	0.328	0.293	0.131	0.023

## Probabilidades de daño a partir del índice de vulnerabilidad medio

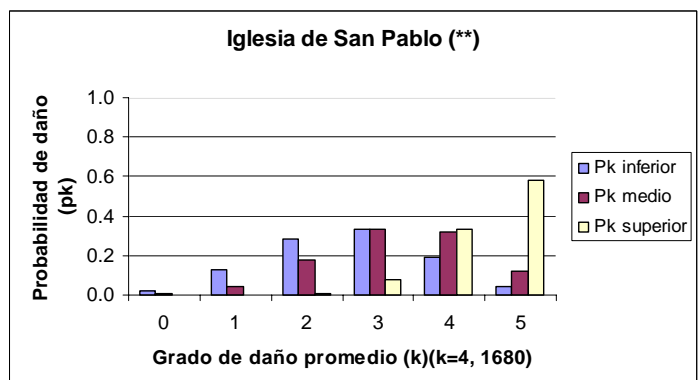
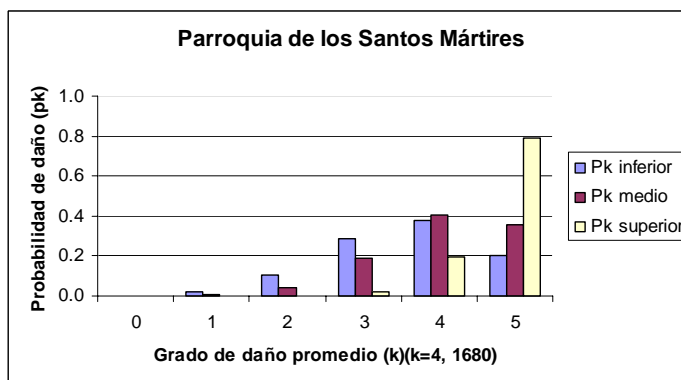
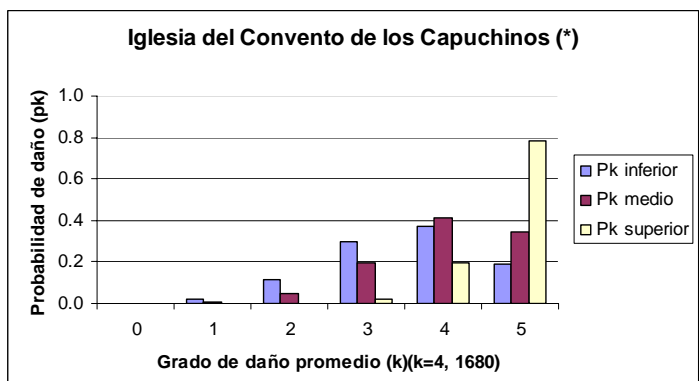
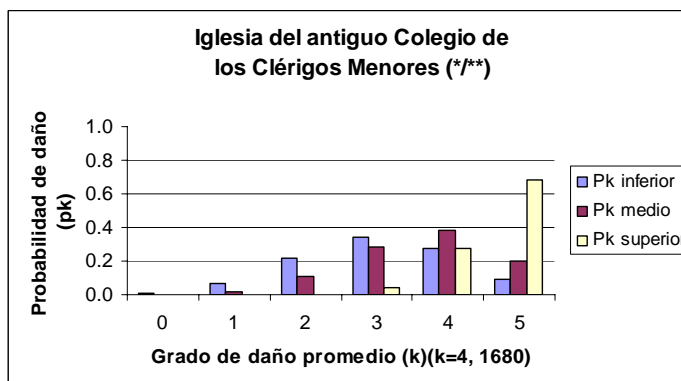
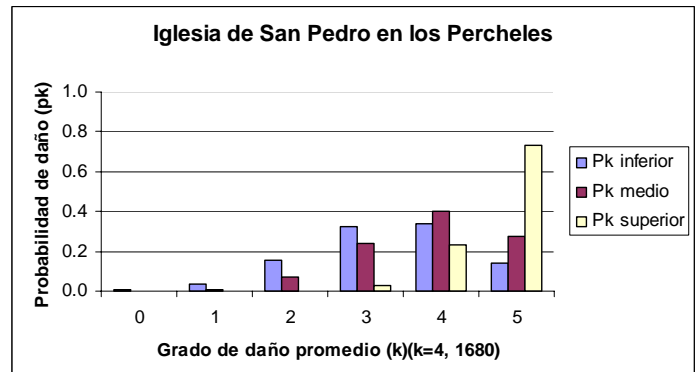
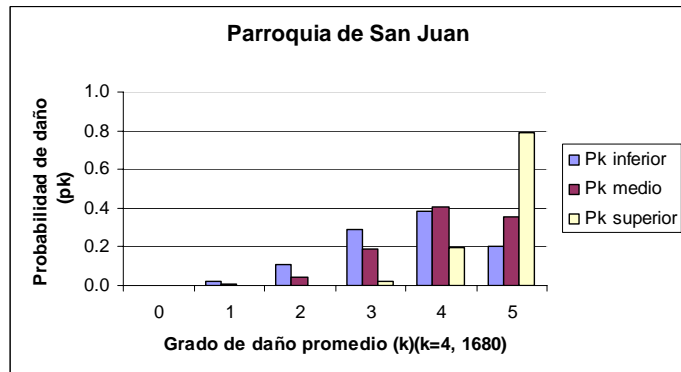
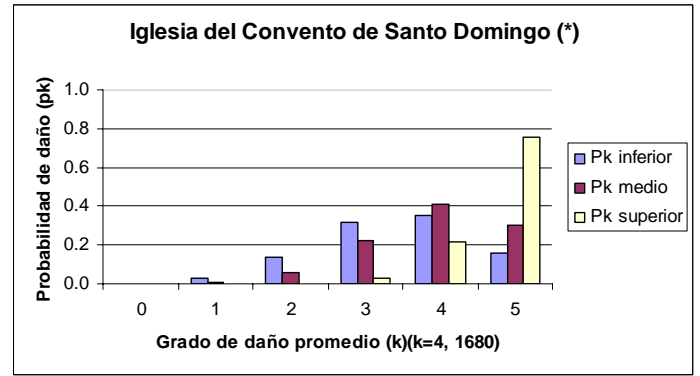
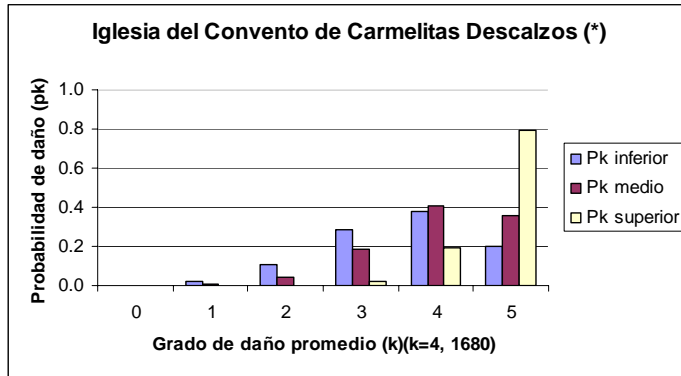
Grado de daño (k)	0	1	2	3	4	5
Monumento						
Iglesia del convento de los Carmelitas Descalzos	0.000	0.005	0.043	0.187	0.408	0.357
Iglesia del convento de Santo Domingo	0.000	0.008	0.060	0.221	0.409	0.302
Parroquia de San Juan	0.000	0.005	0.043	0.187	0.408	0.357
Iglesia de San Pedro en los Percheles	0.001	0.010	0.071	0.239	0.405	0.274
Iglesia del antiguo Colegio de los Clérigos Menores	0.002	0.020	0.108	0.287	0.381	0.202
Iglesia del convento de los Capuchinos	0.000	0.005	0.046	0.194	0.409	0.344
Parroquia de los Santos Mártires	0.000	0.005	0.043	0.187	0.408	0.357
Iglesia de San Pablo	0.005	0.046	0.175	0.334	0.319	0.121
Castillo de Gibralfaro	0.320	0.409	0.210	0.054	0.007	0.000
Alcazaba	0.320	0.409	0.210	0.054	0.007	0.000
Convento de los Ángeles Trinitarios Calzados	0.092	0.281	0.344	0.211	0.065	0.008
Iglesia del antiguo convento de la Compañía de Jesús	0.000	0.002	0.023	0.133	0.388	0.454
Iglesia del convento de Nuestra Señora de la Victoria	0.005	0.046	0.175	0.334	0.319	0.121
Convento de las Recoletas Bernardas del Císter	0.031	0.156	0.313	0.313	0.156	0.031
Parroquia de Sagrario	0.027	0.143	0.303	0.321	0.170	0.036
Casa Episcopal	0.046	0.196	0.333	0.284	0.121	0.021
Colegio Seminario	0.041	0.183	0.328	0.293	0.131	0.023
Convento de San Agustín	0.188	0.373	0.296	0.117	0.023	0.002
Catedral	0.011	0.079	0.234	0.346	0.255	0.075

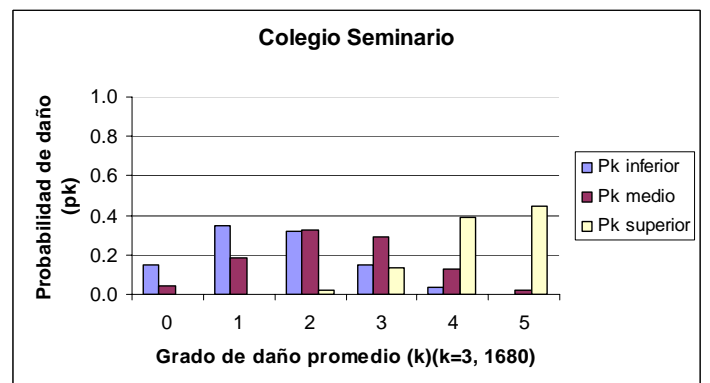
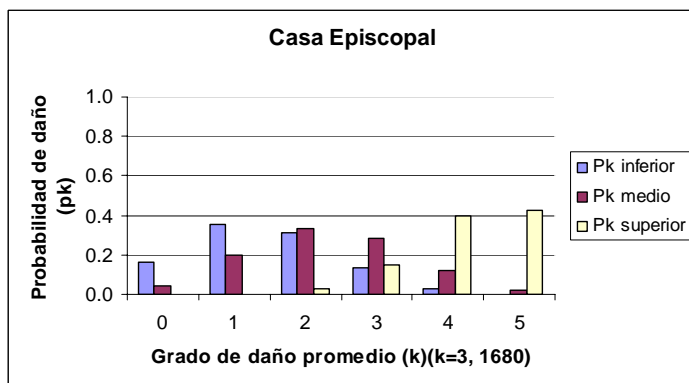
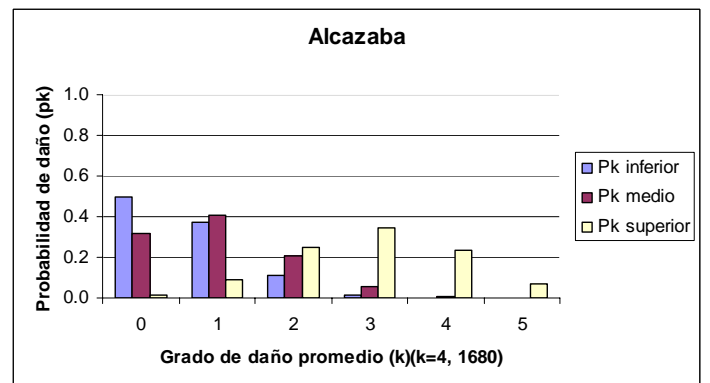
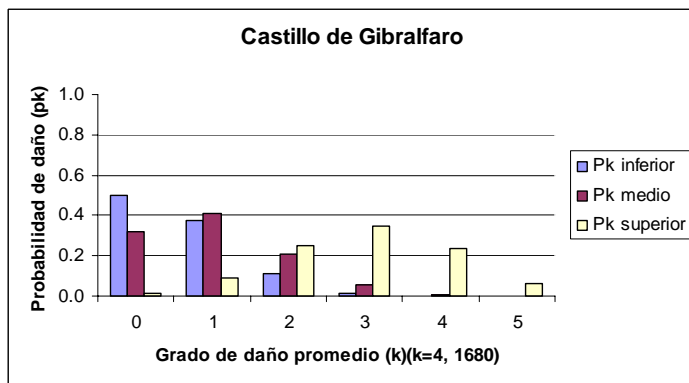
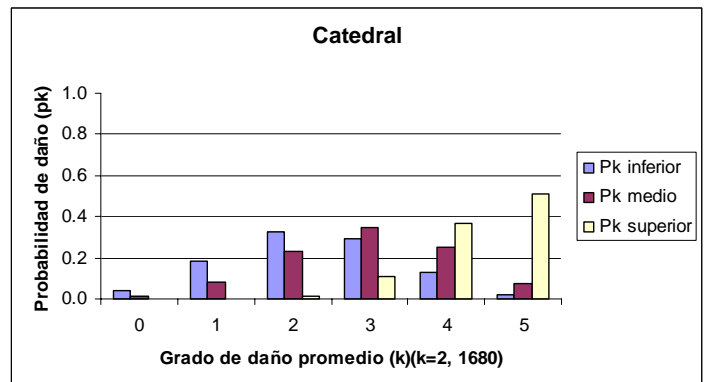
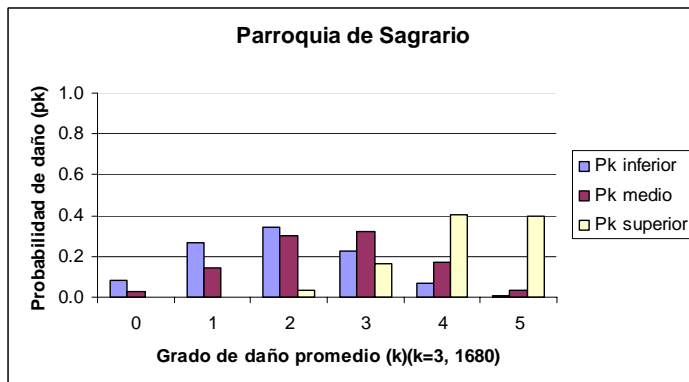
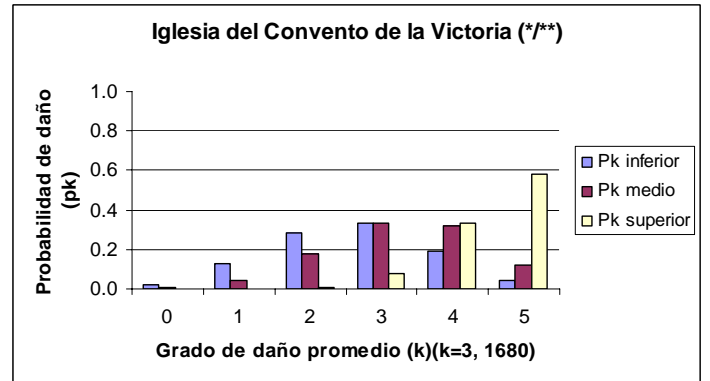
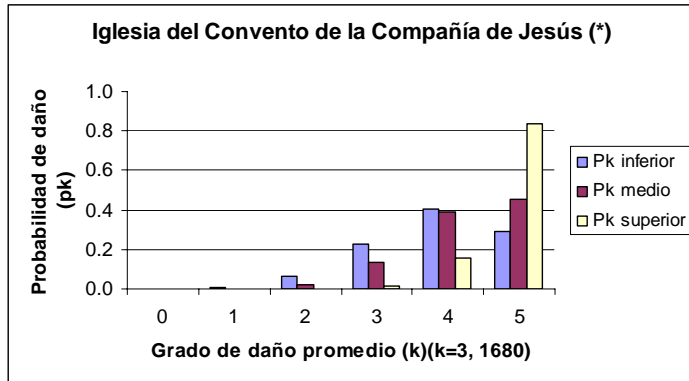
## Probabilidades de daño a partir del índice de vulnerabilidad superior

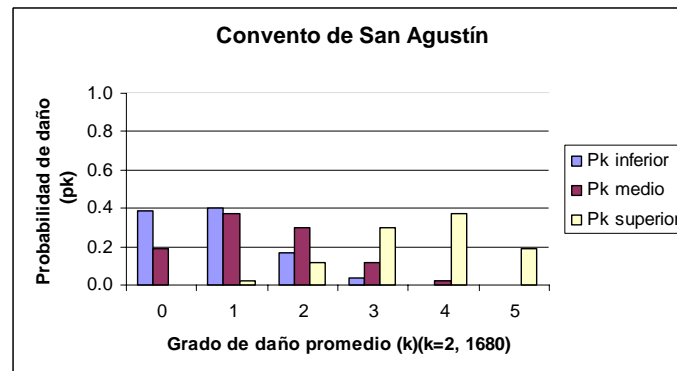
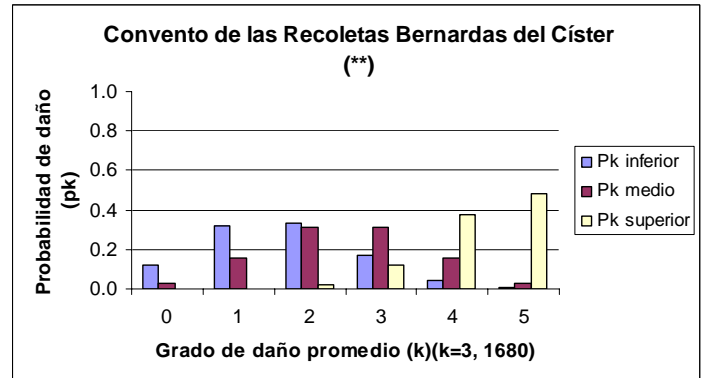
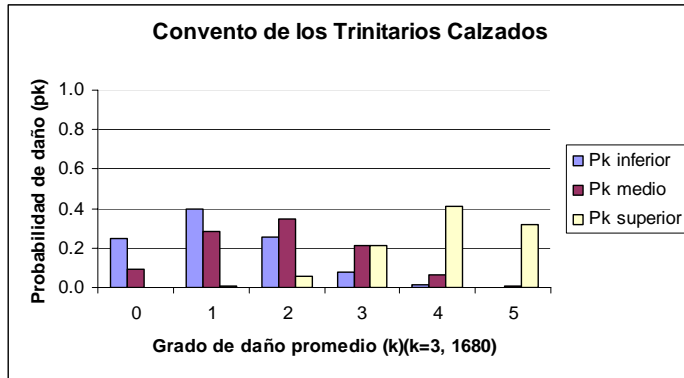
Grado de daño (k)	0	1	2	3	4	5
Monumento						
Iglesia del convento de los Carmelitas Descalzos	0.000	0.000	0.001	0.018	0.191	0.790
Iglesia del convento de Santo Domingo	0.000	0.000	0.001	0.025	0.218	0.755
Parroquia de San Juan	0.000	0.000	0.001	0.019	0.193	0.787
Iglesia de San Pedro en los Percheles	0.000	0.000	0.002	0.030	0.234	0.734
Iglesia del antiguo Colegio de los Clérigos Menores	0.000	0.000	0.003	0.043	0.272	0.681
Iglesia del convento de los Capuchinos	0.000	0.000	0.001	0.020	0.197	0.782
Parroquia de los Santos Mártires	0.000	0.000	0.001	0.019	0.193	0.787
Iglesia de San Pablo	0.000	0.000	0.009	0.075	0.332	0.584
Castillo de Gibralfaro	0.013	0.090	0.249	0.344	0.238	0.066
Alcazaba	0.013	0.090	0.249	0.344	0.238	0.066
Convento de los Ángeles Trinitarios Calzados	0.000	0.007	0.054	0.210	0.409	0.320
Iglesia del antiguo convento de la Compañía de Jesús	0.000	0.000	0.000	0.011	0.153	0.836
Iglesia del convento de Nuestra Señora de la Victoria	0.000	0.000	0.009	0.075	0.332	0.584
Convento de las Recoletas Bernardas del Císter	0.000	0.001	0.019	0.119	0.379	0.481
Parroquia de Sagrario	0.000	0.003	0.033	0.163	0.403	0.399
Casa Episcopal	0.000	0.002	0.027	0.146	0.396	0.428
Colegio Seminario	0.000	0.002	0.024	0.138	0.392	0.444
Convento de San Agustín	0.002	0.023	0.117	0.296	0.373	0.188
Catedral	0.000	0.001	0.015	0.106	0.368	0.510

## **Anexo IX. Histogramas de probabilidades de daño**

En la parte inferior de cada figura se indica el grado de daño  $k$  asignado a cada monumento en el sismo de 1680.







\*: monumento que ha cambiado de tipología desde 1680

\*\* : monumento actual distinto del de 1680

## **Anexo X. Escenarios sísmicos: índices de vulnerabilidad**



## Modificadores del índice de vulnerabilidad: iglesias (1)

Parámetros	Monumento	Ntra. Sra. del Carmen	Santo Domingo	San Juan	San Pedro en los Percheles	La Concepción	Divina Pastora	Santos Mártires
	<b>Tipología</b>	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia
<b>Modificadores generales de <math>V_i</math></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	medio	medio	medio	medio	bueno	medio	medio
	<b>Nivel de daño</b>	severo	severo	severo	severo	severo	severo	severo
	<b>Transformaciones estructurales</b>	sí	sí	sí	no	no	no	sí
	<b>Intervenciones recientes</b>	no	no	sí	sí	no	no	sí
	<b>Calidad de la mampostería</b>	buena	buena	buena	buena	buena	mala	buena
	<b>Morfología de la región</b>	llano	llano	llano	llano	llano	llano	llano
<b>Modificadores particulares de <math>V_i</math></b>	<b>Regularidad en planta</b>	tres naves	central	central	una	una	central	central
	<b>Regularidad en sección</b>	sí	sí	sí	sí	no	sí	sí
	<b>Posición</b>	adosado	adosado	adosado	aislado	adosado	adosado	adosado
	<b>Cúpulas/arcos</b>	sí	sí	sí	sí	sí	sí	sí
	<b>Altura de las paredes laterales</b>	medio	medio	medio	alto	medio	medio	medio

## Modificadores del índice de vulnerabilidad: iglesias (2)

Parámetros	Monumento	San Pablo	Santo Cristo de la Salud	Ntra. Sra. de la Victoria	Sagrario	Catedral	Santiago	San Lázaro
	<b>Tipología</b>	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia
<b>Modificadores generales de <math>V_i</math></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	bueno	medio	bueno	medio	bueno	bueno	medio
	<b>Nivel de daño</b>	nulo	ligero	nulo	ligero	ligero	ligero	ligero
	<b>Transformaciones estructurales</b>	no	sí	no	sí	no	sí	sí
	<b>Intervenciones recientes</b>	no	sí	sí	sí	no	sí	no
	<b>Calidad de la mampostería</b>	buena	mala	buena	buena	buena	buena	buena
	<b>Morfología de la región</b>	llano	llano	llano	llano	llano	llano	llano
<b>Modificadores particulares de <math>V_i</math></b>	<b>Regularidad en planta</b>	central	central	central	una	central	central	una
	<b>Regularidad en sección</b>	sí	sí	sí	no	sí	sí	sí
	<b>Posición</b>	aislado	adosado	aislado	aislado	aislado	adosado	aislado
	<b>Cúpulas/arcos</b>	sí	sí	sí	no	sí	sí	sí
	<b>Altura de las paredes laterales</b>	alto	alto	medio	medio	alto	medio	medio

Valores de los modificadores del índice de vulnerabilidad: iglesias (1)

Parámetros	Monumento	Ntra. Sra. del Carmen	Santo Domingo	San Juan	San Pedro en los Percheles	La Concepción	Divina Pastora	Santos Mártires
	<b>Tipología</b>	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia
<b>V<sub>i</sub> de las tipologías</b>	<b>V<sub>i</sub> inferior</b>	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
	<b>V<sub>i</sub> medio</b>	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
	<b>V<sub>i</sub> superior</b>	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
	$\phi$	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
<b>Modificadores generales de V<sub>i</sub></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.04	0.00	0.00
	<b>Nivel de daño</b>	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	<b>Transformaciones estructurales</b>	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02
	<b>Intervenciones recientes</b>	0.02	0.02	-0.02	-0.02	0.02	0.02	-0.02
	<b>Calidad de la mampostería</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00
	<b>Morfología de la región</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>Corrección V<sub>i</sub> general</b>	0.08	0.08	0.04	0.02	0.02	0.11	0.04
<b>Modificadores particulares de V<sub>i</sub></b>	<b>Regularidad en planta</b>	0.02	-0.02	-0.02	0.00	0.00	-0.02	-0.02
	<b>Regularidad en sección</b>	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04
	<b>Posición</b>	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02	0.02	0.02
	<b>Cúpulas/arcos</b>	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	<b>Altura de las paredes laterales</b>	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
	<b>Corrección V<sub>i</sub> iglesias</b>	0.12	0.08	0.08	0.12	0.06	0.08	0.08
<b>Valores finales de V<sub>i</sub></b>	<b>Corrección V<sub>i</sub> total</b>	<b>0.20</b>	<b>0.16</b>	<b>0.12</b>	<b>0.14</b>	<b>0.08</b>	<b>0.19</b>	<b>0.12</b>
	<b>V<sub>i</sub> final inferior</b>	<b>0.97</b>	<b>0.93</b>	<b>0.89</b>	<b>0.91</b>	<b>0.85</b>	<b>0.96</b>	<b>0.89</b>
	<b>V<sub>i</sub> final medio</b>	<b>1.09</b>	<b>1.05</b>	<b>1.01</b>	<b>1.03</b>	<b>0.97</b>	<b>1.08</b>	<b>1.01</b>
	<b>V<sub>i</sub> final superior</b>	<b>1.46</b>	<b>1.42</b>	<b>1.38</b>	<b>1.40</b>	<b>1.34</b>	<b>1.45</b>	<b>1.38</b>

Valores de los modificadores del índice de vulnerabilidad: iglesias (2)

Parámetros	Monumento	San Pablo	Santo Cristo de la Salud	Ntra. Sra. de la Victoria	Sagrario	Catedral	Santiago	San Lázaro
	<b>Tipología</b>	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia	iglesia
<b>V<sub>i</sub> de las tipologías</b>	<b>V<sub>i</sub> inferior</b>	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
	<b>V<sub>i</sub> medio</b>	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89	0.89
	<b>V<sub>i</sub> superior</b>	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
	$\phi$	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
<b>Modificadores generales de V<sub>i</sub></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	-0.04	0.00	-0.04	0.00	-0.04	-0.04	0.00
	<b>Nivel de daño</b>	0.00	0.02	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02
	<b>Transformaciones estructurales</b>	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02	0.02
	<b>Intervenciones recientes</b>	0.02	-0.02	-0.02	-0.02	0.02	-0.02	0.02
	<b>Calidad de la mampostería</b>	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>Morfología de la región</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>Corrección V<sub>i</sub> general</b>	-0.02	0.07	-0.06	0.02	0.00	-0.02	0.06
<b>Modificadores particulares de V<sub>i</sub></b>	<b>Regularidad en planta</b>	-0.02	-0.02	-0.02	0.00	-0.02	-0.02	0.00
	<b>Regularidad en sección</b>	0.04	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.04
	<b>Posición</b>	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
	<b>Cúpulas/arcos</b>	0.04	0.04	0.04	0.00	0.04	0.04	0.04
	<b>Altura de las paredes laterales</b>	0.04	0.04	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
	<b>Corrección V<sub>i</sub> iglesias</b>	0.10	0.12	0.06	0.00	0.10	0.08	0.08
<b>Valores finales de V<sub>i</sub></b>	<b>Corrección V<sub>i</sub> total</b>	<b>0.08</b>	<b>0.19</b>	<b>0.00</b>	<b>0.02</b>	<b>0.10</b>	<b>0.06</b>	<b>0.14</b>
	<b>V<sub>i</sub> final inferior</b>	<b>0.85</b>	<b>0.96</b>	<b>0.77</b>	<b>0.79</b>	<b>0.87</b>	<b>0.83</b>	<b>0.91</b>
	<b>V<sub>i</sub> final medio</b>	<b>0.97</b>	<b>1.08</b>	<b>0.89</b>	<b>0.91</b>	<b>0.99</b>	<b>0.95</b>	<b>1.03</b>
	<b>V<sub>i</sub> final superior</b>	<b>1.34</b>	<b>1.45</b>	<b>1.26</b>	<b>1.28</b>	<b>1.36</b>	<b>1.32</b>	<b>1.40</b>

## Modificadores del índice de vulnerabilidad: castillos

Parámetros	Monumento	Gibralfaro	Alcazaba
	Tipología	castillo	castillo
Modificadores generales de $V_i$	Estado de mantenimiento	medio	medio
	Nivel de daño	severo	severo
	Transformaciones estructurales	sí	sí
	Intervenciones recientes	sí	sí
	Calidad de la mampostería	mala	mala
	Morfología de la región	colina	colina
Modificadores particulares de $V_i$	Regularidad en planta	no	no
	Regularidad en sección	sí	sí
	Altura	medio	medio

## Valores de los modificadores del índice de vulnerabilidad: castillos

Parámetros	Monumento	Gibralfaro	Alcazaba
	Tipología	castillo	castillo
$V_i$ de las tipologías	$V_i$ inferior	0.356	0.356
	$V_i$ medio	0.456	0.456
	$V_i$ superior	0.766	0.766
	$\phi$	2.3	2.3
Modificadores generales de $V_i$	Estado de mantenimiento	0.00	0.00
	Nivel de daño	0.04	0.04
	Transformaciones estructurales	0.02	0.02
	Intervenciones recientes	-0.02	-0.02
	Calidad de la mampostería	0.05	0.05
	Morfología de la región	0.04	0.04
	Corrección $V_i$ general	0.13	0.13
Modificadores particulares de $V_i$	Regularidad en planta	0.02	0.02
	Regularidad en sección	0.04	0.04
	Altura	0.00	0.00
	Corrección $V_i$ castillos	0.06	0.06
Valores finales de $V_i$	Corrección $V_i$ total	<b>0.19</b>	<b>0.19</b>
	$V_i$ final inferior	<b>0.546</b>	<b>0.546</b>
	$V_i$ final medio	<b>0.646</b>	<b>0.646</b>
	$V_i$ final superior	<b>0.956</b>	<b>0.956</b>

## Modificadores del índice de vulnerabilidad: palacios (1)

Parámetros	Monumento	Casa Episcopal	Colegio Seminario	Casa de los Condes de las Navas	Instituto de Turismo Andaluz	Fundación Martí Torres	Casa del Consulado	Hogar de Jesús Abandonado
	<b>Tipología</b>	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio
<b>Modificadores generales de <math>V_i</math></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	bueno	medio	medio	bueno	medio	bueno	bueno
	<b>Nivel de daño</b>	ligero	ligero	ligero	ninguno	ligero	ligero	ninguno
	<b>Transformaciones estructurales</b>	sí	no	sí	no	no	no	no
	<b>Intervenciones recientes</b>	sí	sí	no	sí	no	no	no
	<b>Calidad de la mampostería</b>	buena	mala	buena	buena	buena	buena	buena
	<b>Morfología de la región</b>	llano	llano	llano	llano	llano	llano	llano
<b>Modificadores particulares de <math>V_i</math></b>	<b>Regularidad en planta</b>	no	sí	no	sí	no	sí	sí
	<b>Regularidad en sección</b>	sí	sí	sí	no	no	sí	no
	<b>Posición</b>	aislado	incluído	incluído	incluído	incluído	incluído	esquina
	<b>Número de plantas</b>	medio	medio	medio	medio	medio	medio	medio
	<b>Claustros/salones</b>	sí	sí	sí	sí	no	sí	sí

## Modificadores del índice de vulnerabilidad: palacios (2)

Parámetros	Monumento	Facultad de Filosofía y Letras	Museo Picasso	Museo de Artes Populares	Antigua casa y taller del escultor Pedro de Mena	Palacio de los Condes de Villalcázar	Gobierno Civil. Antigua Aduana	Banco de España
	<b>Tipología</b>	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio
<b>Modificadores generales de <math>V_i</math></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	bueno	bueno	bueno	bueno	medio	bueno	bueno
	<b>Nivel de daño</b>	ninguno	ligero	ligero	ligero	ligero	ligero	ninguno
	<b>Transformaciones estructurales</b>	no	no	no	no	sí	no	no
	<b>Intervenciones recientes</b>	no	sí	sí	no	sí	no	sí
	<b>Calidad de la mampostería</b>	buena	buena	buena	buena	buena	buena	buena
	<b>Morfología de la región</b>	llano	llano	llano	llano	llano	llano	llano
<b>Modificadores particulares de <math>V_i</math></b>	<b>Regularidad en planta</b>	sí	no	no	sí	no	no	sí
	<b>Regularidad en sección</b>	no	no	no	no	no	sí	no
	<b>Posición</b>	esquina	incluído	incluído	incluído	esquina	aislado	aislado
	<b>Número de plantas</b>	medio	bajo	medio	medio	medio	medio	medio
	<b>Claustros/salones</b>	no	sí	sí	sí	sí	sí	sí

Modificadores del índice de vulnerabilidad: palacios (3)

Parámetros	Monumento	Ayuntamiento	Mercado Central de Atarazanas	Archivo Municipal	Antiguo Palacio Ugarte-Barrientos	Junta de Andalucía	Banco Central	Palacio de Salinas
Modificadores generales de $V_i$	Tipología	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio
	Estado de mantenimiento	medio	bueno	medio	bueno	medio	medio	medio
	Nivel de daño	ninguno	ligero	ligero	ninguno	ligero	ninguno	ligero
	Transformaciones estructurales	no	no	no	no	no	sí	no
	Intervenciones recientes	no	sí	sí	sí	sí	sí	sí
	Calidad de la mampostería	buena	buena	buena	buena	buena	buena	buena
	Morfología de la región	llano	llano	llano	llano	llano	llano	llano
Modificadores particulares de $V_i$	Regularidad en planta	no	sí	sí	sí	sí	sí	sí
	Regularidad en sección	no	no	no	sí	no	no	no
	Posición	aislado	aislado	incluído	final de hilera	extremo	esquina	incluído
	Número de plantas	medio	bajo	medio	alto	medio	medio	medio
	Claustros/salones	sí	sí	sí	sí	no	sí	sí

Modificadores del índice de vulnerabilidad: palacios (4)

Parámetros	Monumento	Cáritas Diocesana	Antiguo Montepío de Viñeros	Antiguo palacio de Valdeflores	Antiguo Conservatorio María Cristina	Antigua Gota de Leche	Palacio Zea Salvatierra	Antiguo Palacio del Marqués de la Sonora	Rectorado de la Universidad de Málaga
Modificadores generales de $V_i$	Tipología	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio
	Estado de mantenimiento	medio	medio	medio	medio	medio	medio	medio	bueno
	Nivel de daño	ligero	ligero	ligero	ligero	ligero	ligero	ligero	ninguno
	Transformaciones estructurales	no	no	no	sí	sí	no	no	no
	Intervenciones recientes	sí	no	sí	sí	sí	no	no	sí
	Calidad de la mampostería	buena	buena	buena	buena	buena	buena	buena	buena
	Morfología de la región	llano	llano	llano	llano	llano	llano	llano	llano
Modificadores particulares de $V_i$	Regularidad en planta	sí	sí	sí	no	no	sí	no	sí
	Regularidad en sección	no	sí	sí	sí	sí	sí	sí	no
	Posición	incluído	esquina	extremo	extremo	esquina	esquina	esquina	aislado
	Número de plantas	medio	medio	medio	medio	bajo	medio	medio	medio
	Claustros/salones	sí	sí	sí	sí	sí	sí	sí	sí

Valores de los modificadores del índice de vulnerabilidad: palacios (1)

Parámetros	Monumento	Casa Episcopal	Colegio Seminario	Casa de los Condes de las Navas	Instituto de Turismo Andaluz	Fundación Martí Torres	Casa del Consulado	Hogar de Jesús Abandonado
	<b>Tipología</b>	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio
<b>V<sub>i</sub> de las tipologías</b>	<b>V<sub>i</sub> inferior</b>	0.496	0.496	0.496	0.496	0.496	0.496	0.496
	<b>V<sub>i</sub> medio</b>	0.616	0.616	0.616	0.616	0.616	0.616	0.616
	<b>V<sub>i</sub> superior</b>	0.956	0.956	0.956	0.956	0.956	0.956	0.956
	<b>φ</b>	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
<b>Modificadores generales de V<sub>i</sub></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	-0.04	0.00	0.00	-0.04	0.00	-0.04	-0.04
	<b>Nivel de daño</b>	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02	0.02	0.00
	<b>Transformaciones estructurales</b>	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>Intervenciones recientes</b>	-0.02	-0.02	0.02	-0.02	0.02	0.02	0.02
	<b>Calidad de la mampostería</b>	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>Morfología de la región</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>Corrección V<sub>i</sub> general</b>	-0.02	0.05	0.06	-0.06	0.04	0.00	-0.02
<b>Modificadores particulares de V<sub>i</sub></b>	<b>Regularidad en planta</b>	0.02	-0.02	0.02	-0.02	0.02	-0.02	-0.02
	<b>Regularidad en sección</b>	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.02
	<b>Posición</b>	0.00	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	0.04
	<b>Número de plantas</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>Claustros/salones</b>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
	<b>Corrección V<sub>i</sub> palacios</b>	0.03	-0.03	0.01	-0.01	0.02	-0.03	0.05
<b>Valores finales de V<sub>i</sub></b>	<b>Corrección V<sub>i</sub> total</b>	<b>0.01</b>	<b>0.02</b>	<b>0.07</b>	<b>-0.07</b>	<b>0.06</b>	<b>-0.03</b>	<b>0.03</b>
	<b>V<sub>i</sub> final inferior</b>	<b>0.506</b>	<b>0.516</b>	<b>0.566</b>	<b>0.426</b>	<b>0.556</b>	<b>0.466</b>	<b>0.526</b>
	<b>V<sub>i</sub> final medio</b>	<b>0.626</b>	<b>0.636</b>	<b>0.686</b>	<b>0.546</b>	<b>0.676</b>	<b>0.586</b>	<b>0.646</b>
	<b>V<sub>i</sub> final superior</b>	<b>0.966</b>	<b>0.976</b>	<b>1.026</b>	<b>0.886</b>	<b>1.016</b>	<b>0.926</b>	<b>0.986</b>

Valores de los modificadores del índice de vulnerabilidad: palacios (2)

Parámetros	Monumento	Facultad de Filosofía y Letras	Museo Picasso	Museo de Artes Populares	Antigua casa y taller del escultor Pedro de Mena	Palacio de los Condes de Villalcázar	Gobierno Civil. Antigua Aduana	Banco de España
	<b>Tipología</b>	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio
<b>V<sub>i</sub> de las tipologías</b>	<b>V<sub>i</sub> inferior</b>	0.496	0.496	0.496	0.496	0.496	0.496	0.496
	<b>V<sub>i</sub> medio</b>	0.616	0.616	0.616	0.616	0.616	0.616	0.616
	<b>V<sub>i</sub> superior</b>	0.956	0.956	0.956	0.956	0.956	0.956	0.956
	<b>φ</b>	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
<b>Modificadores generales de V<sub>i</sub></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	0.00	-0.04	-0.04
	<b>Nivel de daño</b>	0.00	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00
	<b>Transformaciones estructurales</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
	<b>Intervenciones recientes</b>	0.02	-0.02	-0.02	0.02	-0.02	0.02	-0.02
	<b>Calidad de la mampostería</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>Morfología de la región</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>Corrección V<sub>i</sub> general</b>	-0.02	-0.04	-0.04	0.00	0.02	0.00	-0.06
<b>Modificadores particulares de V<sub>i</sub></b>	<b>Regularidad en planta</b>	-0.02	0.02	0.02	-0.02	0.02	0.02	-0.02
	<b>Regularidad en sección</b>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02
	<b>Posición</b>	0.04	-0.02	-0.02	-0.02	0.04	0.00	0.00
	<b>Número de plantas</b>	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>Claustros/salones</b>	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	<b>Corrección V<sub>i</sub> palacios</b>	0.04	0.01	0.03	-0.01	0.09	0.03	0.01
<b>Valores finales de V<sub>i</sub></b>	<b>Corrección V<sub>i</sub> total</b>	<b>0.02</b>	<b>-0.03</b>	<b>-0.01</b>	<b>-0.01</b>	<b>0.11</b>	<b>0.03</b>	<b>-0.05</b>
	<b>V<sub>i</sub> final inferior</b>	<b>0.516</b>	<b>0.466</b>	<b>0.486</b>	<b>0.486</b>	<b>0.606</b>	<b>0.526</b>	<b>0.446</b>
	<b>V<sub>i</sub> final medio</b>	<b>0.636</b>	<b>0.586</b>	<b>0.606</b>	<b>0.606</b>	<b>0.726</b>	<b>0.646</b>	<b>0.566</b>
	<b>V<sub>i</sub> final superior</b>	<b>0.976</b>	<b>0.926</b>	<b>0.946</b>	<b>0.946</b>	<b>1.066</b>	<b>0.986</b>	<b>0.906</b>



Valores de los modificadores del índice de vulnerabilidad: palacios (3)

Parámetros	Monumento	Ayuntamiento	Mercado Central de Atarazanas	Archivo Municipal	Antiguo Palacio Ugarte-Barrientos	Junta de Andalucía	Banco Central	Palacio de Salinas
	<b>Tipología</b>	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio
<b>V<sub>i</sub> de las tipologías</b>	<b>V<sub>i</sub> inferior</b>	0.496	0.496	0.496	0.496	0.496	0.496	0.496
	<b>V<sub>i</sub> medio</b>	0.616	0.616	0.616	0.616	0.616	0.616	0.616
	<b>V<sub>i</sub> superior</b>	0.956	0.956	0.956	0.956	0.956	0.956	0.956
	<b>φ</b>	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
<b>Modificadores generales de V<sub>i</sub></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	0.00	-0.04	0.00	-0.04	0.00	0.00	0.00
	<b>Nivel de daño</b>	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.02
	<b>Transformaciones estructurales</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
	<b>Intervenciones recientes</b>	0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02
	<b>Calidad de la mampostería</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>Morfología de la región</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>Corrección V<sub>i</sub> general</b>	0.02	-0.06	0.00	-0.06	0.00	0.00	0.00
<b>Modificadores particulares de V<sub>i</sub></b>	<b>Regularidad en planta</b>	0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02	-0.02
	<b>Regularidad en sección</b>	0.02	0.02	0.02	0.00	0.02	0.02	0.02
	<b>Posición</b>	0.00	0.00	-0.02	0.04	0.04	0.04	-0.02
	<b>Número de plantas</b>	0.00	-0.02	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
	<b>Claustros/salones</b>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01
	<b>Corrección V<sub>i</sub> palacios</b>	0.05	-0.01	-0.01	0.07	0.04	0.05	-0.01
<b>Valores finales de V<sub>i</sub></b>	<b>Corrección V<sub>i</sub> total</b>	<b>0.07</b>	<b>-0.07</b>	<b>-0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>0.04</b>	<b>0.05</b>	<b>-0.01</b>
	<b>V<sub>i</sub> final inferior</b>	<b>0.566</b>	<b>0.426</b>	<b>0.486</b>	<b>0.506</b>	<b>0.536</b>	<b>0.546</b>	<b>0.486</b>
	<b>V<sub>i</sub> final medio</b>	<b>0.686</b>	<b>0.546</b>	<b>0.606</b>	<b>0.626</b>	<b>0.656</b>	<b>0.666</b>	<b>0.606</b>
	<b>V<sub>i</sub> final superior</b>	<b>1.026</b>	<b>0.886</b>	<b>0.946</b>	<b>0.966</b>	<b>0.996</b>	<b>1.006</b>	<b>0.946</b>

Valores de los modificadores del índice de vulnerabilidad: palacios (4)

Parámetros	Monumento	Cáritas Diocesana	Antiguo Montepío de Viñeros	Antiguo palacio de Valdeflores	Antiguo Conservatorio María Cristina	Antigua Gota de Leche	Palacio Zea Salvatierra	Antiguo Palacio del Marqués de la Sonora	Rectorado de la Universidad de Málaga
	<b>Tipología</b>	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio	palacio
<b>V<sub>i</sub> de las tipologías</b>	<b>V<sub>i</sub> inferior</b>	0.496	0.496	0.496	0.496	0.496	0.496	0.496	0.496
	<b>V<sub>i</sub> medio</b>	0.616	0.616	0.616	0.616	0.616	0.616	0.616	0.616
	<b>V<sub>i</sub> superior</b>	0.956	0.956	0.956	0.956	0.956	0.956	0.956	0.956
	<b>φ</b>	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
<b>Modificadores generales de V<sub>i</sub></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.04
	<b>Nivel de daño</b>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.00
	<b>Transformaciones estructurales</b>	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00
	<b>Intervenciones recientes</b>	-0.02	0.02	-0.02	-0.02	-0.02	0.02	0.02	-0.02
	<b>Calidad de la mampostería</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>Morfología de la región</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>Corrección V<sub>i</sub> general</b>	0.00	0.04	0.00	0.02	0.02	0.04	0.04	-0.06
<b>Modificadores particulares de V<sub>i</sub></b>	<b>Regularidad en planta</b>	-0.02	-0.02	-0.02	0.02	0.02	-0.02	0.02	-0.02
	<b>Regularidad en sección</b>	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
	<b>Posición</b>	-0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.00
	<b>Número de plantas</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.02	0.00	0.00	0.00
	<b>Claustros/salones</b>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	<b>Corrección V<sub>i</sub> palacios</b>	-0.01	0.03	0.03	0.07	0.05	0.03	0.07	0.01
<b>Valores finales de V<sub>i</sub></b>	<b>Corrección V<sub>i</sub> total</b>	<b>-0.01</b>	<b>0.07</b>	<b>0.03</b>	<b>0.09</b>	<b>0.07</b>	<b>0.07</b>	<b>0.11</b>	<b>-0.05</b>
	<b>V<sub>i</sub> final inferior</b>	<b>0.486</b>	<b>0.566</b>	<b>0.526</b>	<b>0.586</b>	<b>0.566</b>	<b>0.566</b>	<b>0.606</b>	<b>0.446</b>
	<b>V<sub>i</sub> final medio</b>	<b>0.606</b>	<b>0.686</b>	<b>0.646</b>	<b>0.706</b>	<b>0.686</b>	<b>0.686</b>	<b>0.726</b>	<b>0.566</b>
	<b>V<sub>i</sub> final superior</b>	<b>0.946</b>	<b>1.026</b>	<b>0.986</b>	<b>1.046</b>	<b>1.026</b>	<b>1.026</b>	<b>1.066</b>	<b>0.906</b>

Modificadores del índice de vulnerabilidad: monasterios

Parámetros	Monumento	Trinitarios Calzados	Abadía de Santa Ana	San Agustín	Antiguo hospicio de San Julián	Las Dominicas
	<b>Tipología</b>	monasterio	monasterio	monasterio	monasterio	monasterio
<b>Modificadores generales de <math>V_i</math></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	bueno	bueno	bueno	bueno	bueno
	<b>Nivel de daño</b>	ligero	ligero	ligero	ligero	ligero
	<b>Transformaciones estructurales</b>	sí	sí	no	no	no
	<b>Intervenciones recientes</b>	no	sí	no	sí	no
	<b>Calidad de la mampostería</b>	buena	buena	buena	buena	buena
	<b>Morfología de la región</b>	llano	llano	llano	llano	llano
<b>Modificadores particulares de <math>V_i</math></b>	<b>Regularidad en planta</b>	sí	sí	sí	no	no
	<b>Regularidad en sección</b>	sí	sí	no	sí	no
	<b>Posición</b>	aislado	incluido	incluido	esquina	adosado
	<b>Número de plantas</b>	bajo	bajo	medio	bajo	medio
	<b>Claustros/salones</b>	sí	sí	sí	sí	sí

Valores de los modificadores del índice de vulnerabilidad: monasterios

Parámetros	Monumento	Trinitarios Calzados	Abadía de Santa Ana	San Agustín	Antiguo hospicio de San Julián	Las Dominicas
	<b>Tipología</b>	monasterio	monasterio	monasterio	monasterio	monasterio
<b><math>V_i</math> de las tipologías</b>	<b><math>V_i</math> inferior</b>	0.616	0.616	0.616	0.616	0.616
	<b><math>V_i</math> medio</b>	0.736	0.736	0.736	0.736	0.736
	<b><math>V_i</math> superior</b>	1.076	1.076	1.076	1.076	1.076
	<b><math>\phi</math></b>	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
<b>Modificadores generales de <math>V_i</math></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
	<b>Nivel de daño</b>	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
	<b>Transformaciones estructurales</b>	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00
	<b>Intervenciones recientes</b>	0.02	-0.02	0.02	-0.02	0.02
	<b>Calidad de la mampostería</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>Morfología de la región</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	<b>Corrección <math>V_i</math> general</b>	0.02	-0.02	0.00	-0.04	0.00
<b>Modificadores particulares de <math>V_i</math></b>	<b>Regularidad en planta</b>	-0.02	-0.02	-0.02	0.02	0.02
	<b>Regularidad en sección</b>	0.00	0.02	0.02	0.00	0.02
	<b>Posición</b>	0.00	-0.02	-0.02	0.04	0.04
	<b>Número de plantas</b>	-0.02	-0.02	0.00	-0.02	0.00
	<b>Claustros/salones</b>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	<b>Corrección <math>V_i</math> monasterios</b>	-0.03	-0.03	-0.01	0.05	0.09
<b>Valores finales de <math>V_i</math></b>	<b>Corrección <math>V_i</math> total</b>	<b>-0.01</b>	<b>-0.05</b>	<b>-0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>0.09</b>
	<b><math>V_i</math> final inferior</b>	<b>0.606</b>	<b>0.566</b>	<b>0.606</b>	<b>0.626</b>	<b>0.706</b>
	<b><math>V_i</math> final medio</b>	<b>0.726</b>	<b>0.686</b>	<b>0.726</b>	<b>0.746</b>	<b>0.826</b>
	<b><math>V_i</math> final superior</b>	<b>1.066</b>	<b>1.026</b>	<b>1.066</b>	<b>1.086</b>	<b>1.166</b>

## Modificadores del índice de vulnerabilidad: ermitas

Parámetros	Monumento	Capilla del Agua
	Tipología	ermita
Modificadores generales de $V_i$	Estado de mantenimiento	bueno
	Nivel de daño	ligero
	Transformaciones estructurales	no
	Intervenciones recientes	sí
	Calidad de la mampostería	bueno
	Morfología de la región	llano
Modificadores particulares de $V_i$	Regularidad en planta	una
	Regularidad en sección	sí
	Posición	adosado
	Cúpulas/arcos	sí
	Altura de las paredes laterales	alto

## Valores de los modificadores del índice de vulnerabilidad: ermitas

Parámetros	Monumento	Capilla del Agua
	Tipología	ermita
$V_i$ de las tipologías	$V_i$ inferior	0.65
	$V_i$ medio	0.77
	$V_i$ superior	1.14
	$\phi$	3.0
Modificadores generales de $V_i$	Estado de mantenimiento	-0.04
	Nivel de daño	0.02
	Transformaciones estructurales	0.00
	Intervenciones recientes	-0.02
	Calidad de la mampostería	0.00
	Morfología de la región	0.00
	Corrección $V_i$ general	-0.04
Modificadores particulares de $V_i$	Regularidad en planta	0.00
	Regularidad en sección	0.04
	Posición	0.02
	Cúpulas/arcos	0.04
	Altura de las paredes laterales	0.04
	Corrección $V_i$ ermitas	0.14
Valores finales de $V_i$	Corrección $V_i$ total	<b>0.10</b>
	$V_i$ final inferior	<b>0.75</b>
	$V_i$ final medio	<b>0.87</b>
	$V_i$ final superior	<b>1.24</b>

Modificadores del índice de vulnerabilidad: teatros

Parámetros	Monumento	Teatro Cervantes	Teatro romano
	<b>Tipología</b>	teatro	teatro
<b>Modificadores generales de <math>V_i</math></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	bueno	malo
	<b>Nivel de daño</b>	ninguno	severo
	<b>Transformaciones estructurales</b>	no	sí
	<b>Intervenciones recientes</b>	sí	sí
	<b>Calidad de la mampostería</b>	buena	buena
	<b>Morfología de la región</b>	llano	pendiente
<b>Modificadores particulares de <math>V_i</math></b>	<b>Regularidad en planta</b>	sí	no
	<b>Regularidad en sección</b>	sí	no
	<b>Posición</b>	adosado	aislado
	<b>Altura</b>	alto	bajo

Valores de los modificadores del índice de vulnerabilidad: teatros

Parámetros	Monumento	Teatro Cervantes	Teatro romano
	<b>Tipología</b>	teatro	teatro
<b><math>V_i</math> de las tipologías</b>	<b><math>V_i</math> inferior</b>	0.616	0.616
	<b><math>V_i</math> medio</b>	0.736	0.736
	<b><math>V_i</math> superior</b>	1.086	1.086
	<b><math>\phi</math></b>	2.65	2.65
<b>Modificadores generales de <math>V_i</math></b>	<b>Estado de mantenimiento</b>	-0.04	0.04
	<b>Nivel de daño</b>	0.00	0.04
	<b>Transformaciones estructurales</b>	0.00	0.02
	<b>Intervenciones recientes</b>	-0.02	-0.02
	<b>Calidad de la mampostería</b>	0.00	0.00
	<b>Morfología de la región</b>	0.00	0.02
	<b>Corrección <math>V_i</math> general</b>	-0.06	0.10
<b>Modificadores particulares de <math>V_i</math></b>	<b>Regularidad en planta</b>	-0.02	0.02
	<b>Regularidad en sección</b>	0.02	0.00
	<b>Posición</b>	0.04	0.00
	<b>Altura</b>	0.06	-0.02
	<b>Corrección <math>V_i</math> teatros</b>	0.10	0.00
<b>Valores finales de <math>V_i</math></b>	<b>Corrección <math>V_i</math> total</b>	<b>0.04</b>	<b>0.10</b>
	<b><math>V_i</math> final inferior</b>	<b>0.656</b>	<b>0.716</b>
	<b><math>V_i</math> final medio</b>	<b>0.776</b>	<b>0.836</b>
	<b><math>V_i</math> final superior</b>	<b>1.126</b>	<b>1.186</b>

Modificadores del índice de vulnerabilidad: torres

Parámetros	Monumento	Alcubilla Mayor del acueducto de San Telmo
	Tipología	torre
Modificadores generales de $V_i$	Estado de mantenimiento	medio
	Nivel de daño	ligero
	Transformaciones estructurales	no
	Intervenciones recientes	no
	Calidad de la mampostería	buena
	Morfología de la región	pendiente
Modificadores particulares de $V_i$	Regularidad en planta	cuadrada
	Posición	2 lados
	Altura total	media
	Altura del elemento que sobresale	alta
	Lado mínimo	largo
	Varillas de acero	no

Valores de los modificadores del índice de vulnerabilidad: torres

Parámetros	Monumento	Alcubilla Mayor del acueducto de San Telmo
	Tipología	torre
$V_i$ de las tipologías	$V_i$ inferior	0.636
	$V_i$ medio	0.776
	$V_i$ superior	1.136
	$\phi$	2.3
Modificadores generales de $V_i$	Estado de mantenimiento	0.00
	Nivel de daño	0.02
	Transformaciones estructurales	0.00
	Intervenciones recientes	0.02
	Calidad de la mampostería	0.00
	Morfología de la región	0.02
	Corrección $V_i$ general	0.06
Modificadores particulares de $V_i$	Regularidad en planta	0.00
	Posición	0.02
	Altura total	0.00
	Altura del elemento que sobresale	0.02
	Lado mínimo	0.00
	Varillas de acero	0.04
	Corrección $V_i$ torres	0.08
Valores finales de $V_i$	Corrección $V_i$ total	<b>0.14</b>
	$V_i$ final inferior	<b>0.776</b>
	$V_i$ final medio	<b>0.916</b>
	$V_i$ final superior	<b>1.276</b>



## **Anexo XI. Escenario determinista: terremoto de 1680**

### **Grados de daño**



Monumento	Tipología	$\mu_d$ inferior	$\mu_d$ medio	$\mu_d$ superior
Iglesia de Nuestra Señora del Carmen	iglesia	3.94	4.30	4.83
Iglesia del convento de Santo Domingo	iglesia	3.79	4.19	4.80
Parroquia de San Juan Bautista	iglesia	3.94	4.30	4.83
Iglesia de San Pedro en los Percheles	iglesia	3.71	4.13	4.78
Iglesia de la Concepción	iglesia	3.79	4.19	4.80
Iglesia de la Divina Pastora y Santa Teresa de Jesús	iglesia	3.90	4.27	4.82
Parroquia de los Santos Mártires	iglesia	3.94	4.30	4.83
Iglesia de San Pablo	iglesia	3.46	3.94	4.73
Castillo de Gibralfaro	castillo	0.94	1.42	3.41
Alcazaba	castillo	0.94	1.42	3.41
Convento de San Onofre de Trinitarios Calzados	monasterio	1.65	2.43	4.29
Iglesia del Santo Cristo de la Salud (San Telmo)	iglesia	4.16	4.45	4.87
Iglesia del convento de Nuestra Señora de la Victoria	iglesia	3.08	3.63	4.63
Abadía de Santa Ana	monasterio	1.90	2.70	4.41
Parroquia de Sagrario	iglesia	2.36	2.98	4.37
Casa Episcopal	palacio	2.03	2.84	4.46
Colegio Seminario	palacio	2.10	2.90	4.49
Convento de San Agustín	monasterio	1.21	1.90	3.98
Santa iglesia de la Catedral / Basílica de la Encarnación	iglesia	2.78	3.37	4.53
Parroquia de Santiago	iglesia	2.57	3.18	4.45
Antiguo hospicio de San Julián	monasterio	2.84	3.58	4.71
Teatro Cervantes	teatro	2.97	3.60	4.65
Casa de los Condes de las Navas	palacio	2.43	3.23	4.60
Instituto de Turismo Andaluz	palacio	1.11	1.77	3.89
Fundación Martí Torres	palacio	2.36	3.16	4.58
Casa del Consulado	palacio	1.77	2.57	4.35
Hogar de Jesús Abandonado	palacio	2.16	2.97	4.51
Facultad de Filosofía y Letras	palacio	0.82	1.37	3.52
Museo Picasso	palacio	0.65	1.11	3.23
Museo de Artes Populares	palacio	1.42	2.16	4.14
Antigua casa y taller del escultor Pedro de Mena	palacio	0.71	1.21	3.35
Palacio de los Condes de Villalcázar	palacio	2.16	2.97	4.51
Gobierno Civil. Antigua Aduana	palacio	0.86	1.42	3.58
Banco de España	palacio	0.59	1.02	3.10
Ayuntamiento	palacio	1.02	1.65	3.79
Mercado Central de Atarazanas	palacio	1.53	2.30	4.22
Capilla del Agua	ermita	3.37	3.86	4.70
Iglesia y convento de las Dominicas (vulgo Catalinas)	monasterio	2.84	3.58	4.71
Archivo Municipal	palacio	1.90	2.70	4.41
Antiguo Palacio Ugarte-Barrientos	palacio	2.03	2.84	4.46
Sede de Gobernación de la Junta de Andalucía	palacio	2.23	3.04	4.54
Banco Central	palacio	2.30	3.10	4.56
Palacio de Salinas	palacio	1.90	2.70	4.41
Cáritas Diocesana	palacio	1.90	2.70	4.41
Antiguo Montepío de Viñeros	palacio	2.43	3.23	4.60
Antiguo palacio de Valdeflores	palacio	1.65	2.43	4.29
Antiguo Conservatorio María Cristina	palacio	2.03	2.84	4.46
Alcubilla Mayor del acueducto de San Telmo	torre	3.29	4.02	4.83
Antigua Gota de Leche	palacio	1.90	2.70	4.41
Palacio Zea Salvatierra	palacio	1.02	1.65	3.79
Antiguo Palacio del Marqués de la Sonora	palacio	1.21	1.90	3.98
Teatro romano	teatro	1.92	2.62	4.26
Iglesia de San Lázaro	iglesia	4.00	4.34	4.84
Rectorado de la Universidad de Málaga	palacio	0.59	1.02	3.10

## **Tablas de probabilidades de daño**

## Probabilidades de daño a partir del índice de vulnerabilidad inferior

Monumento \ Grado de daño (k)	0	1	2	3	4	5
Iglesia de Nuestra Señora del Carmen	0.000	0.008	0.059	0.220	0.409	0.304
Iglesia del convento de Santo Domingo	0.001	0.013	0.081	0.255	0.399	0.250
Parroquia de San Juan Bautista	0.000	0.008	0.059	0.220	0.409	0.304
Iglesia de San Pedro en los Percheles	0.001	0.016	0.095	0.272	0.391	0.225
Iglesia de la Concepción	0.001	0.013	0.081	0.255	0.399	0.250
Iglesia de la Divina Pastora y Santa Teresa de Jesús	0.001	0.009	0.065	0.230	0.407	0.289
Parroquia de los Santos Mártires	0.000	0.008	0.059	0.220	0.409	0.304
Iglesia de San Pablo	0.003	0.031	0.140	0.314	0.353	0.159
Castillo de Gibralfaro	0.353	0.409	0.189	0.044	0.005	0.000
Alcazaba	0.353	0.409	0.189	0.044	0.005	0.000
Convento de San Onofre de Trinitarios Calzados	0.135	0.332	0.328	0.161	0.040	0.004
Iglesia del Santo Cristo de la Salud (San Telmo)	0.000	0.003	0.033	0.163	0.403	0.399
Iglesia del convento de Ntra. Sra. de la Victoria	0.008	0.067	0.215	0.345	0.276	0.089
Abadía de Santa Ana	0.092	0.281	0.344	0.211	0.065	0.008
Parroquia de Sagrario	0.041	0.183	0.328	0.293	0.131	0.023
Casa Episcopal	0.074	0.253	0.345	0.236	0.081	0.011
Colegio Seminario	0.066	0.238	0.344	0.249	0.090	0.013
Convento de San Agustín	0.250	0.399	0.255	0.081	0.013	0.001
Catedral	0.017	0.108	0.271	0.339	0.212	0.053
Parroquia de Santiago	0.027	0.143	0.303	0.321	0.170	0.036
Antiguo hospicio de San Julián	0.015	0.099	0.261	0.342	0.224	0.059
Teatro Cervantes	0.011	0.081	0.237	0.345	0.252	0.073
Casa de los Condes de las Navas	0.036	0.169	0.321	0.304	0.144	0.027
Instituto de Turismo Andaluz	0.284	0.406	0.233	0.067	0.010	0.001
Fundación Martí Torres	0.041	0.183	0.328	0.294	0.132	0.024
Casa del Consulado	0.112	0.307	0.338	0.186	0.051	0.006
Hogar de Jesús Abandonado	0.059	0.224	0.342	0.261	0.099	0.015
Facultad de Filosofía y Letras	0.408	0.401	0.157	0.031	0.003	0.000
Museo Picasso	0.498	0.372	0.111	0.017	0.001	0.000
Museo de Artes Populares	0.188	0.373	0.296	0.118	0.023	0.002
Antigua casa y taller del escultor Pedro de Mena	0.465	0.385	0.127	0.021	0.002	0.000
Palacio de los Condes de Villalcázar	0.059	0.224	0.342	0.261	0.099	0.015
Gobierno Civil. Antigua Aduana	0.389	0.404	0.168	0.035	0.004	0.000
Banco de España	0.534	0.357	0.096	0.013	0.001	0.000
Ayuntamiento	0.320	0.409	0.210	0.054	0.007	0.000
Mercado Central de Atarazanas	0.160	0.354	0.314	0.139	0.031	0.003
Capilla del Agua	0.004	0.038	0.158	0.326	0.336	0.139
Iglesia y convento de las Dominicas	0.015	0.099	0.261	0.342	0.224	0.059
Archivo Municipal	0.092	0.281	0.344	0.211	0.065	0.008
Antiguo Palacio Ugarte-Barrientos	0.074	0.253	0.345	0.236	0.081	0.011
Sede de Gobernación de la Junta de Andalucía	0.052	0.210	0.338	0.272	0.110	0.018
Banco Central	0.046	0.196	0.333	0.283	0.120	0.020
Palacio de Salinas	0.092	0.281	0.344	0.211	0.065	0.008
Cáritas Diocesana	0.092	0.281	0.344	0.211	0.065	0.008
Antiguo Montepío de Viñeros	0.036	0.169	0.321	0.304	0.144	0.027
Antiguo palacio de Valdeflores	0.135	0.332	0.328	0.162	0.040	0.004
Antiguo Conservatorio María Cristina	0.074	0.253	0.345	0.236	0.081	0.011
Alcubilla Mayor del acueducto de San Telmo	0.005	0.045	0.174	0.333	0.320	0.123
Antigua Gota de Leche	0.092	0.281	0.344	0.211	0.065	0.008
Palacio Zea Salvatierra	0.320	0.409	0.210	0.054	0.007	0.000
Antiguo Palacio del Marqués de la Sonora	0.250	0.399	0.255	0.081	0.013	0.001
Teatro romano	0.089	0.276	0.345	0.215	0.067	0.008
Iglesia de San Lázaro	0.000	0.006	0.051	0.205	0.410	0.328
Rectorado de la Universidad de Málaga	0.534	0.357	0.096	0.013	0.001	0.000

## Probabilidades de daño a partir del índice de vulnerabilidad medio

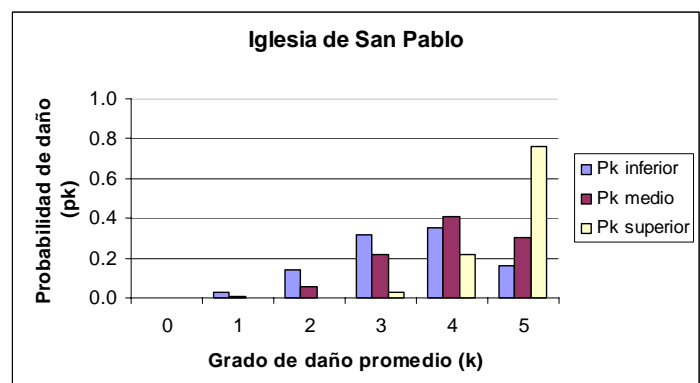
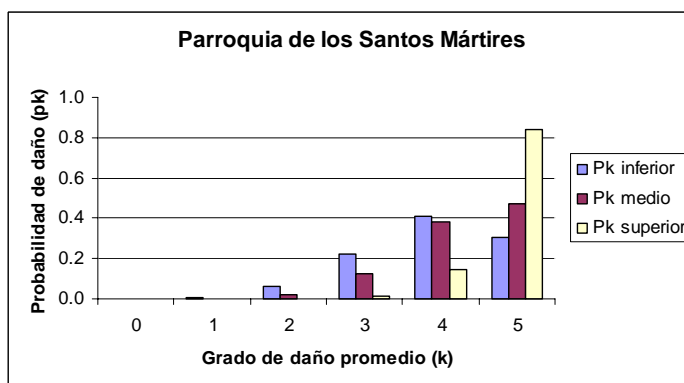
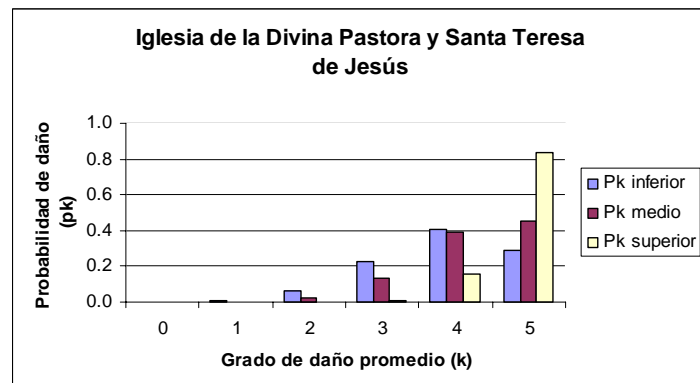
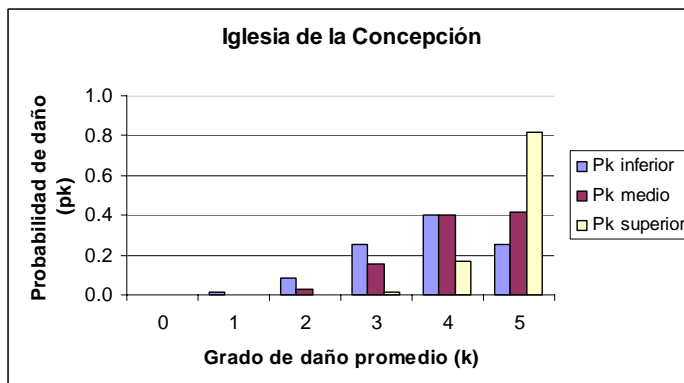
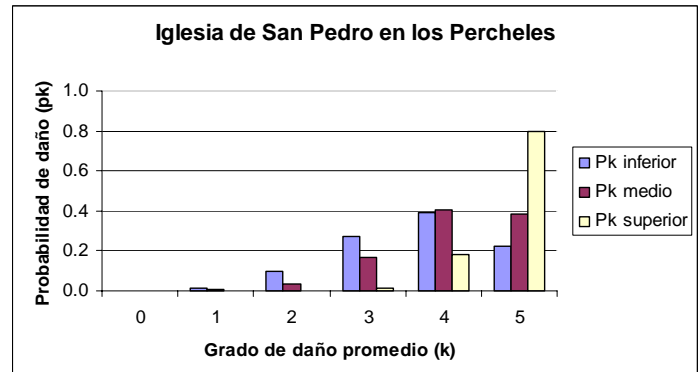
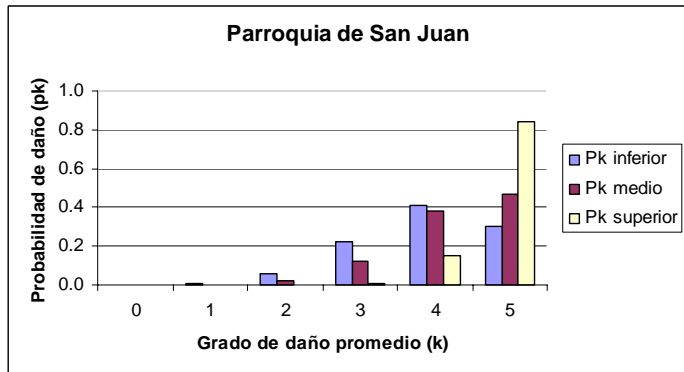
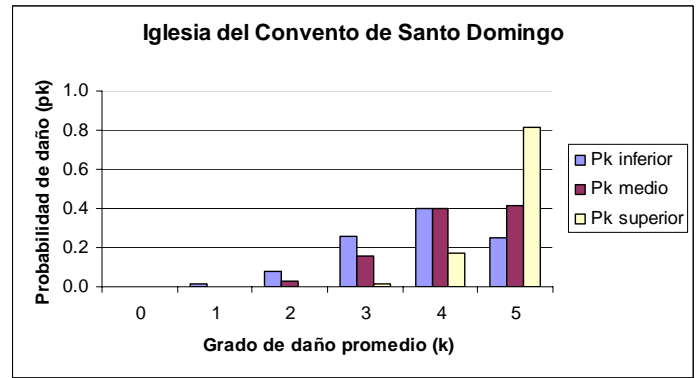
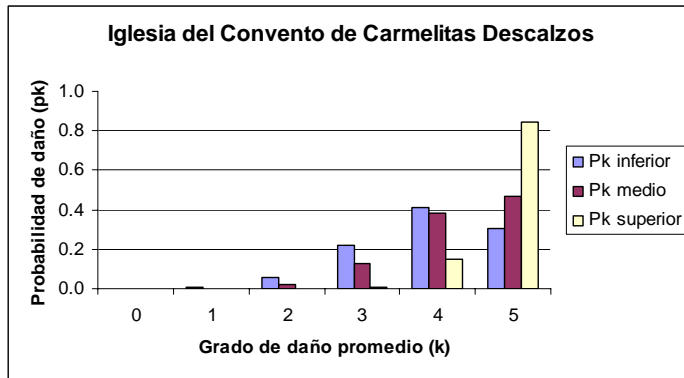
Monumento \ Grado de daño (k)	0	1	2	3	4	5
Iglesia de Nuestra Señora del Carmen	0.000	0.002	0.020	0.125	0.383	0.470
Iglesia del convento de Santo Domingo	0.000	0.003	0.030	0.154	0.399	0.413
Parroquia de San Juan Bautista	0.000	0.002	0.020	0.125	0.383	0.470
Iglesia de San Pedro en los Percheles	0.000	0.004	0.036	0.171	0.405	0.385
Iglesia de la Concepción	0.000	0.003	0.030	0.154	0.399	0.413
Iglesia de la Divina Pastora y Santa Teresa de Jesús	0.000	0.002	0.023	0.133	0.388	0.454
Parroquia de los Santos Mártires	0.000	0.002	0.020	0.125	0.383	0.470
Iglesia de San Pablo	0.000	0.008	0.059	0.220	0.409	0.304
Castillo de Gibralfaro	0.188	0.373	0.296	0.117	0.023	0.002
Alcazaba	0.188	0.373	0.296	0.117	0.023	0.002
Convento de San Onofre de Trinitarios Calzados	0.036	0.170	0.321	0.303	0.143	0.027
Iglesia del Santo Cristo de la Salud (San Telmo)	0.000	0.001	0.011	0.085	0.345	0.558
Iglesia del convento de Ntra. Sra. de la Victoria	0.002	0.020	0.108	0.287	0.381	0.202
Abadía de Santa Ana	0.021	0.121	0.284	0.333	0.196	0.046
Parroquia de Sagrario	0.011	0.079	0.234	0.346	0.255	0.075
Casa Episcopal	0.015	0.099	0.260	0.342	0.225	0.059
Colegio Seminario	0.013	0.090	0.249	0.344	0.238	0.066
Convento de San Agustín	0.092	0.281	0.344	0.211	0.065	0.008
Catedral	0.004	0.038	0.157	0.325	0.336	0.139
Parroquia de Santiago	0.006	0.056	0.195	0.341	0.298	0.104
Antiguo hospicio de San Julián	0.002	0.023	0.118	0.296	0.373	0.188
Teatro Cervantes	0.002	0.022	0.114	0.293	0.376	0.193
Casa de los Condes de las Navas	0.006	0.051	0.186	0.338	0.307	0.112
Instituto de Turismo Andaluz	0.112	0.307	0.338	0.186	0.051	0.006
Fundación Martí Torres	0.007	0.058	0.198	0.342	0.294	0.101
Casa del Consulado	0.027	0.144	0.304	0.321	0.169	0.036
Hogar de Jesús Abandonado	0.011	0.081	0.236	0.345	0.253	0.074
Facultad de Filosofía y Letras	0.202	0.381	0.287	0.108	0.020	0.002
Museo Picasso	0.285	0.407	0.232	0.066	0.009	0.001
Museo de Artes Populares	0.059	0.225	0.342	0.260	0.099	0.015
Antigua casa y taller del escultor Pedro de Mena	0.250	0.399	0.255	0.081	0.013	0.001
Palacio de los Condes de Villalcázar	0.011	0.081	0.236	0.345	0.253	0.074
Gobierno Civil. Antigua Aduana	0.188	0.373	0.296	0.117	0.023	0.002
Banco de España	0.320	0.409	0.210	0.054	0.007	0.000
Ayuntamiento	0.135	0.332	0.328	0.161	0.040	0.004
Mercado Central de Atarazanas	0.046	0.196	0.333	0.283	0.120	0.020
Capilla del Agua	0.001	0.010	0.070	0.238	0.405	0.276
Iglesia y convento de las Dominicas	0.002	0.023	0.118	0.296	0.373	0.188
Archivo Municipal	0.021	0.121	0.284	0.333	0.196	0.046
Antiguo Palacio Ugarte-Barrientos	0.015	0.099	0.260	0.342	0.225	0.059
Sede de Gobernación de la Junta de Andalucía	0.009	0.072	0.223	0.345	0.268	0.083
Banco Central	0.008	0.065	0.211	0.344	0.281	0.092
Palacio de Salinas	0.020	0.120	0.283	0.333	0.196	0.046
Cáritas Diocesana	0.020	0.120	0.283	0.333	0.196	0.046
Antiguo Montepío de Viñeros	0.006	0.051	0.186	0.338	0.307	0.112
Antiguo palacio de Valdeflores	0.036	0.169	0.321	0.304	0.144	0.027
Antiguo Conservatorio María Cristina	0.015	0.099	0.261	0.342	0.224	0.059
Alcubilla Mayor del acueducto de San Telmo	0.000	0.006	0.049	0.199	0.409	0.336
Antigua Gota de Leche	0.020	0.120	0.283	0.333	0.196	0.046
Palacio Zea Salvatierra	0.135	0.332	0.328	0.161	0.040	0.004
Antiguo Palacio del Marqués de la Sonora	0.092	0.281	0.344	0.211	0.065	0.008
Teatro romano	0.024	0.135	0.296	0.326	0.179	0.040
Iglesia de San Lázaro	0.000	0.001	0.017	0.114	0.375	0.493
Rectorado de la Universidad de Málaga	0.320	0.409	0.210	0.054	0.007	0.000

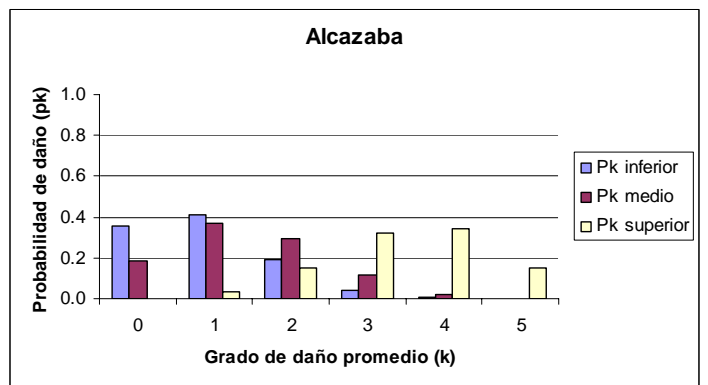
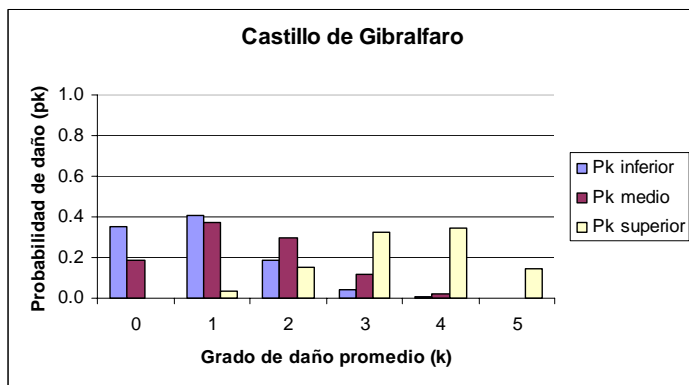
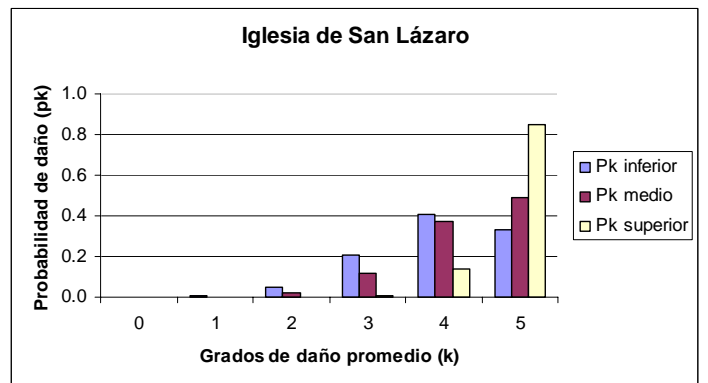
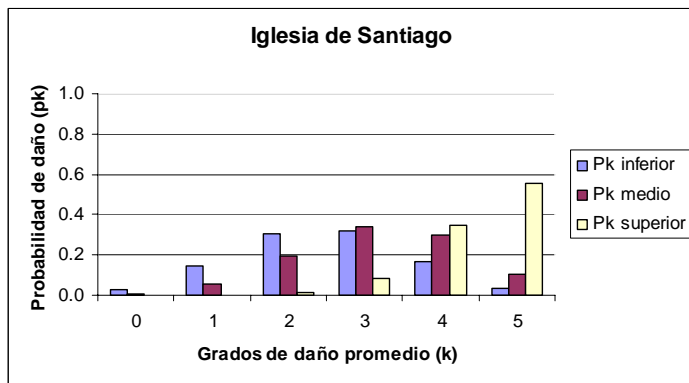
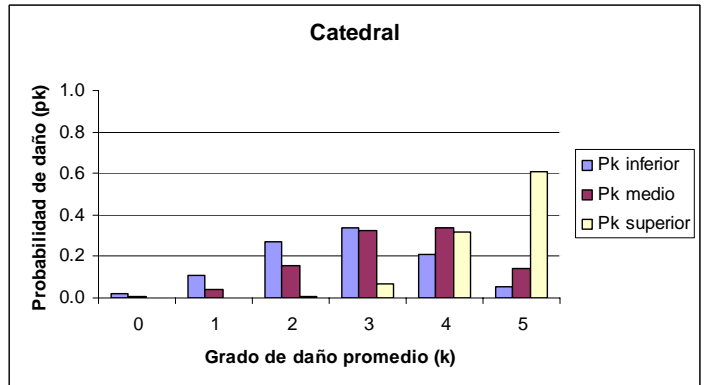
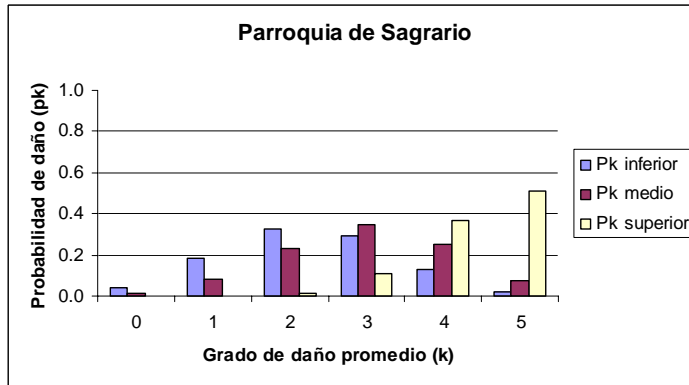
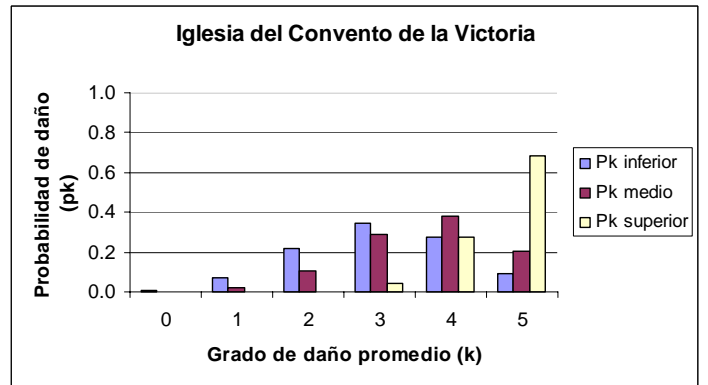
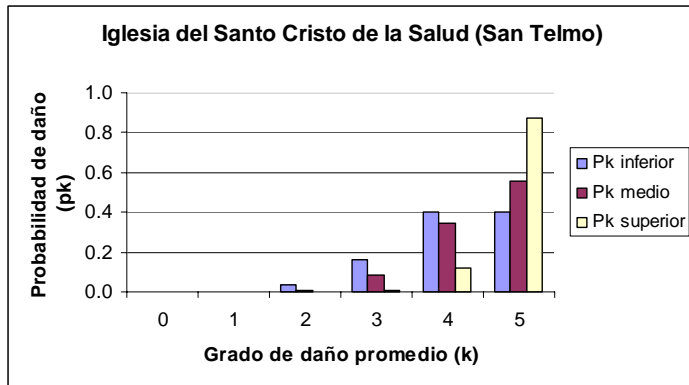
## Probabilidades de daño a partir del índice de vulnerabilidad superior

Monumento \ Grado de daño (k)	0	1	2	3	4	5
Iglesia de Nuestra Señora del Carmen	0.000	0.000	0.000	0.010	0.148	0.841
Iglesia del convento de Santo Domingo	0.000	0.000	0.001	0.014	0.170	0.815
Parroquia de San Juan Bautista	0.000	0.000	0.000	0.010	0.148	0.841
Iglesia de San Pedro en los Percheles	0.000	0.000	0.001	0.017	0.184	0.799
Iglesia de la Concepción	0.000	0.000	0.001	0.014	0.170	0.815
Iglesia de la Divina Pastora y Santa Teresa de Jesús	0.000	0.000	0.000	0.012	0.155	0.833
Parroquia de los Santos Mártires	0.000	0.000	0.000	0.010	0.148	0.841
Iglesia de San Pablo	0.000	0.000	0.001	0.025	0.216	0.758
Castillo de Gibralfaro	0.003	0.035	0.150	0.321	0.344	0.148
Alcazaba	0.003	0.035	0.150	0.321	0.344	0.148
Convento de San Onofre de Trinitarios Calzados	0.000	0.002	0.021	0.127	0.385	0.465
Iglesia del Santo Cristo de la Salud (San Telmo)	0.000	0.000	0.000	0.006	0.117	0.877
Iglesia del convento de Ntra. Sra. de la Victoria	0.000	0.000	0.003	0.043	0.272	0.681
Abadía de Santa Ana	0.000	0.001	0.013	0.096	0.357	0.534
Parroquia de Sagrario	0.000	0.001	0.015	0.106	0.368	0.510
Casa Episcopal	0.000	0.001	0.010	0.083	0.342	0.565
Colegio Seminario	0.000	0.000	0.009	0.075	0.332	0.584
Convento de San Agustín	0.000	0.007	0.054	0.210	0.409	0.320
Catedral	0.000	0.000	0.007	0.066	0.317	0.610
Parroquia de Santiago	0.000	0.001	0.011	0.085	0.345	0.558
Antiguo hospicio de San Julián	0.000	0.000	0.002	0.029	0.231	0.738
Teatro Cervantes	0.000	0.000	0.003	0.039	0.261	0.698
Casa de los Condes de las Navas	0.000	0.000	0.004	0.050	0.286	0.660
Instituto de Turismo Andaluz	0.001	0.009	0.066	0.232	0.407	0.285
Fundación Martí Torres	0.000	0.000	0.005	0.054	0.295	0.645
Casa del Consulado	0.000	0.001	0.017	0.111	0.372	0.499
Hogar de Jesús Abandonado	0.000	0.000	0.007	0.070	0.323	0.600
Facultad de Filosofía y Letras	0.002	0.027	0.129	0.306	0.364	0.173
Museo Picasso	0.006	0.051	0.185	0.338	0.308	0.113
Museo de Artes Populares	0.000	0.004	0.035	0.168	0.404	0.389
Antigua casa y taller del escultor Pedro de Mena	0.004	0.040	0.161	0.328	0.332	0.135
Palacio de los Condes de Villalcázar	0.000	0.000	0.008	0.070	0.324	0.597
Gobierno Civil. Antigua Aduana	0.002	0.023	0.117	0.296	0.373	0.188
Banco de España	0.008	0.065	0.211	0.344	0.281	0.092
Ayuntamiento	0.001	0.013	0.081	0.255	0.399	0.250
Mercado Central de Atarazanas	0.000	0.003	0.027	0.147	0.396	0.427
Capilla del Agua	0.000	0.000	0.002	0.029	0.232	0.737
Iglesia y convento de las Dominicas	0.000	0.000	0.002	0.029	0.231	0.738
Archivo Municipal	0.000	0.001	0.013	0.096	0.357	0.534
Antiguo Palacio Ugarte-Barrientos	0.000	0.001	0.010	0.083	0.342	0.565
Sede de Gobernación de la Junta de Andalucía	0.000	0.000	0.006	0.063	0.313	0.617
Banco Central	0.000	0.000	0.006	0.059	0.305	0.631
Palacio de Salinas	0.000	0.001	0.013	0.096	0.357	0.534
Cáritas Diocesana	0.000	0.001	0.013	0.096	0.357	0.534
Antiguo Montepío de Viñeros	0.000	0.000	0.004	0.050	0.286	0.660
Antiguo palacio de Valdeflores	0.000	0.002	0.021	0.128	0.385	0.463
Antiguo Conservatorio María Cristina	0.000	0.001	0.010	0.082	0.341	0.567
Alcubilla Mayor del acueducto de San Telmo	0.000	0.000	0.000	0.010	0.145	0.844
Antigua Gota de Leche	0.000	0.001	0.013	0.096	0.357	0.534
Palacio Zea Salvatierra	0.001	0.013	0.081	0.255	0.399	0.250
Antiguo Palacio del Marqués de la Sonora	0.000	0.007	0.054	0.210	0.409	0.320
Teatro romano	0.000	0.002	0.024	0.135	0.390	0.449
Iglesia de San Lázaro	0.000	0.000	0.000	0.009	0.140	0.850
Rectorado de la Universidad de Málaga	0.008	0.065	0.211	0.344	0.281	0.092

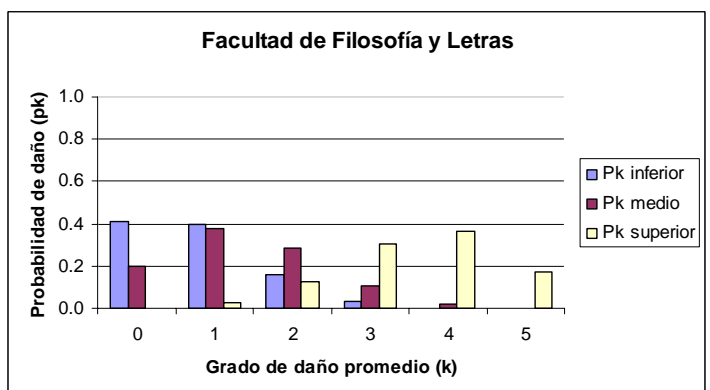
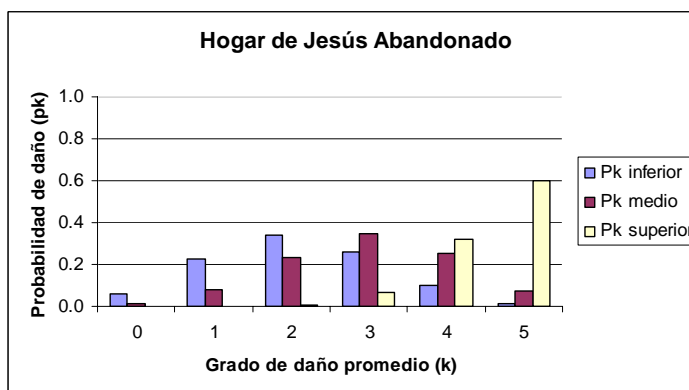
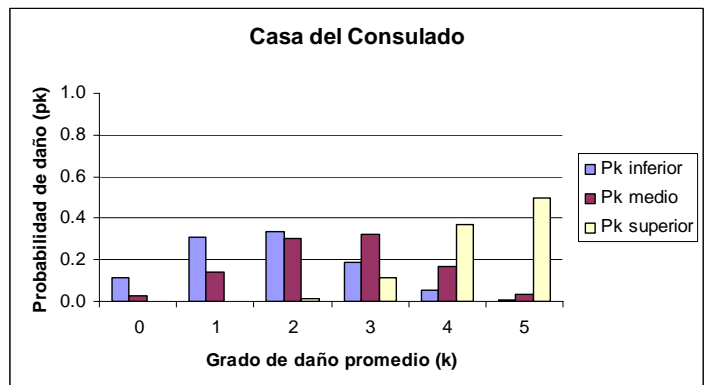
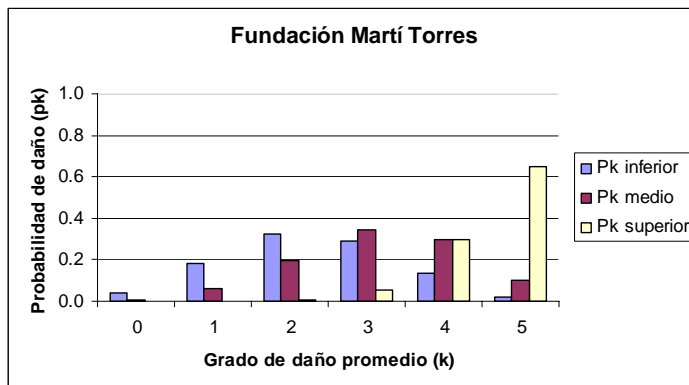
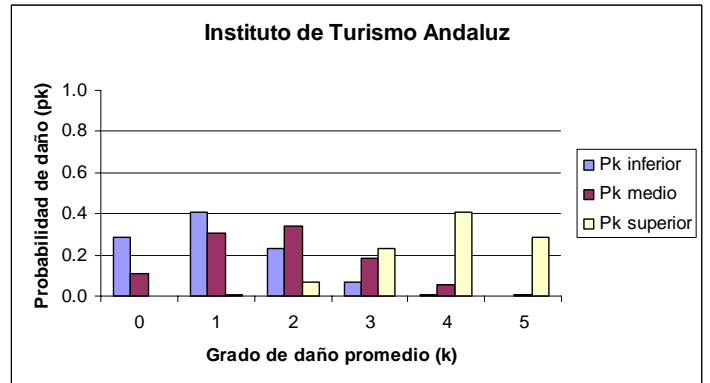
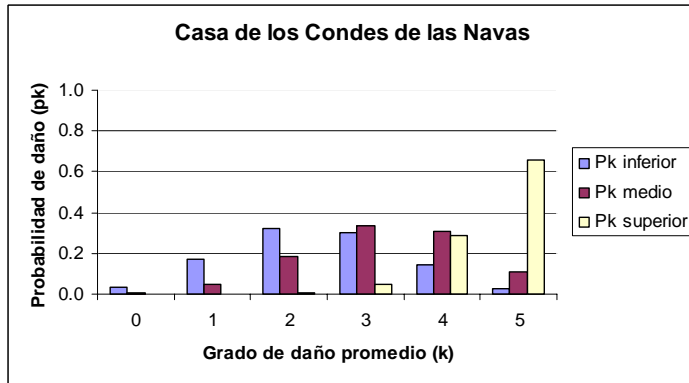
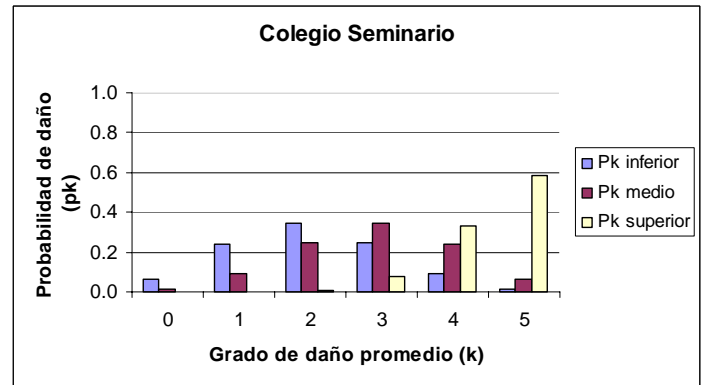
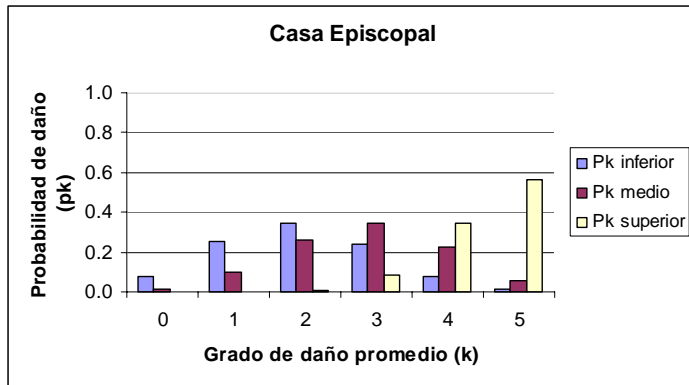
## **Histogramas de probabilidades de daño**

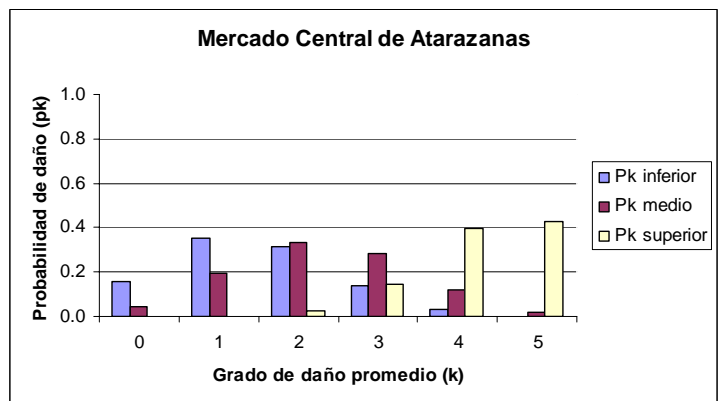
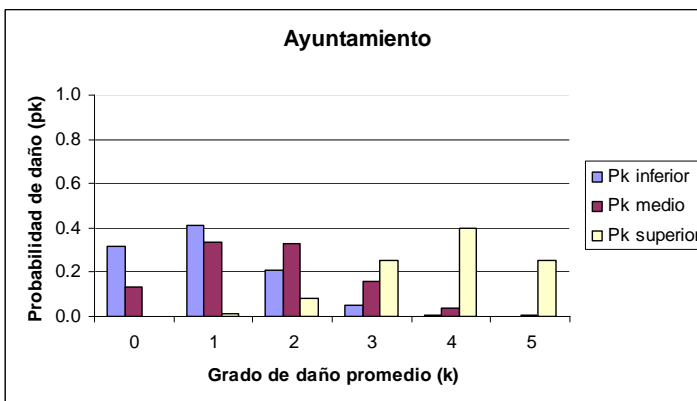
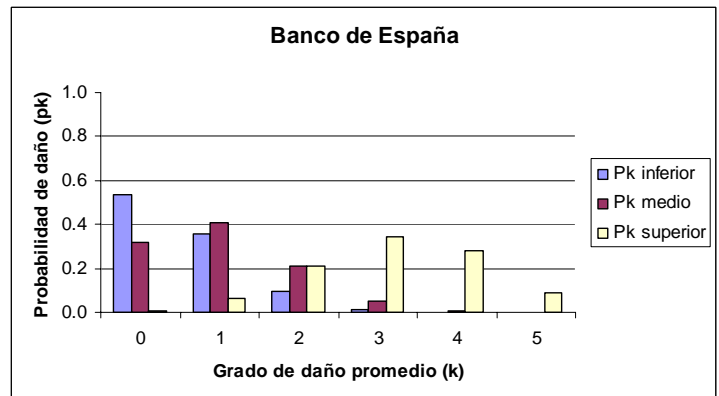
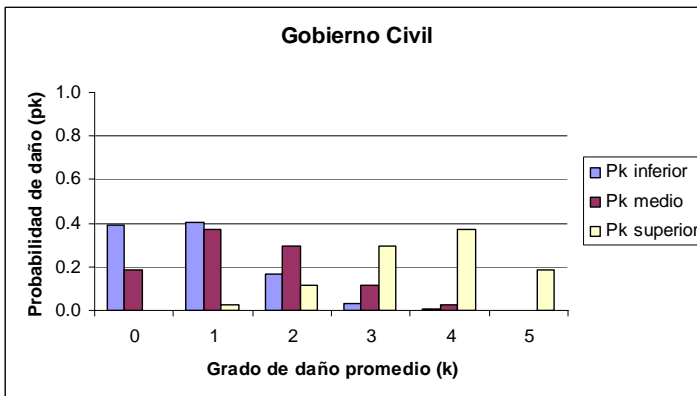
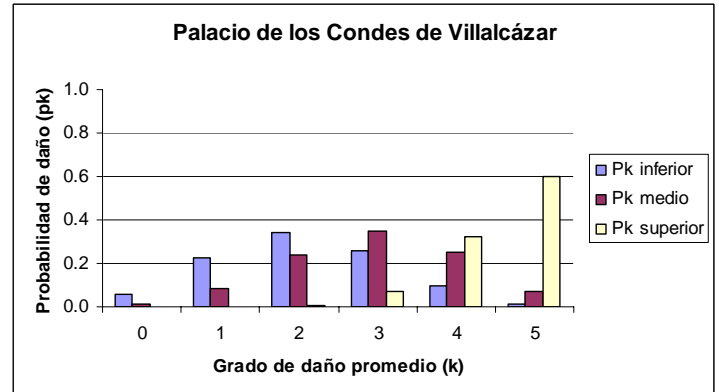
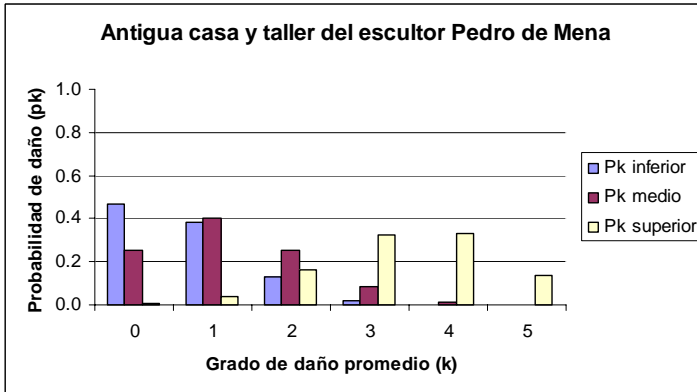
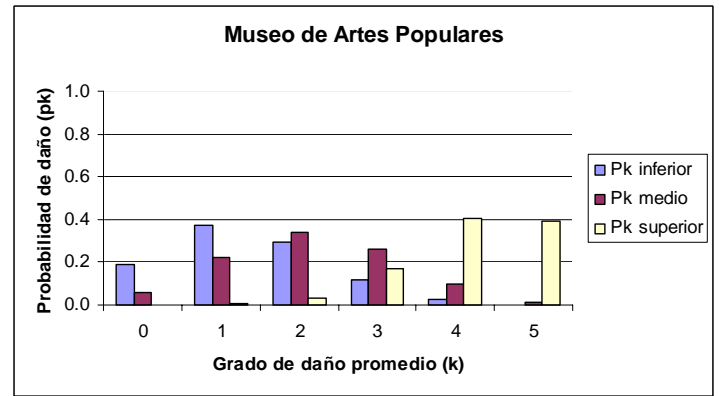
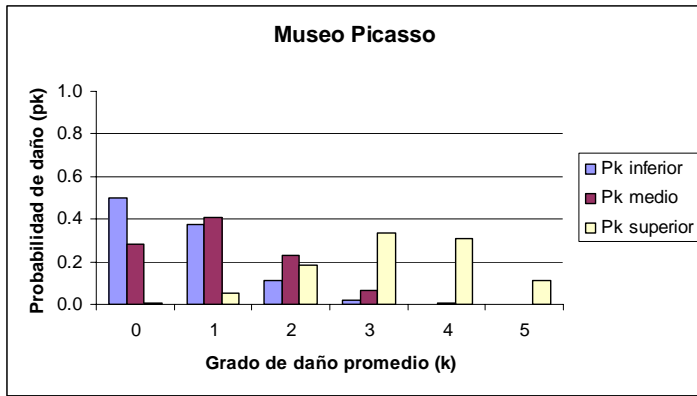
Las figuras aparecen ordenadas según la referencia del monumento, y clasificadas según su tipología: iglesias, castillos, palacios, monasterios, ermitas, teatros y torres.

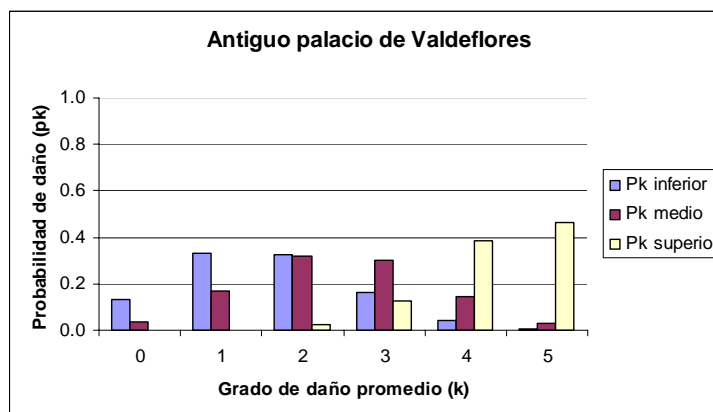
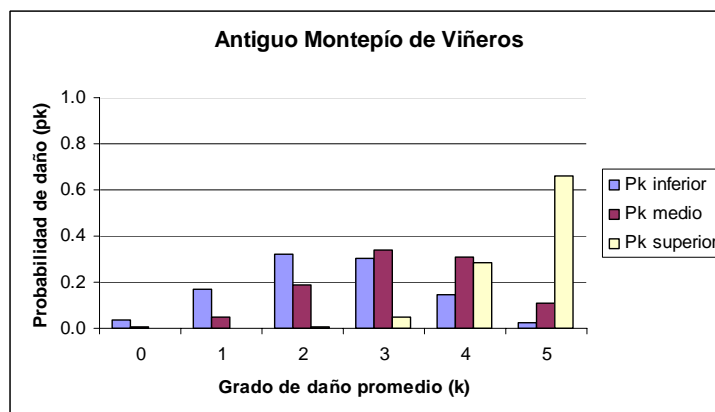
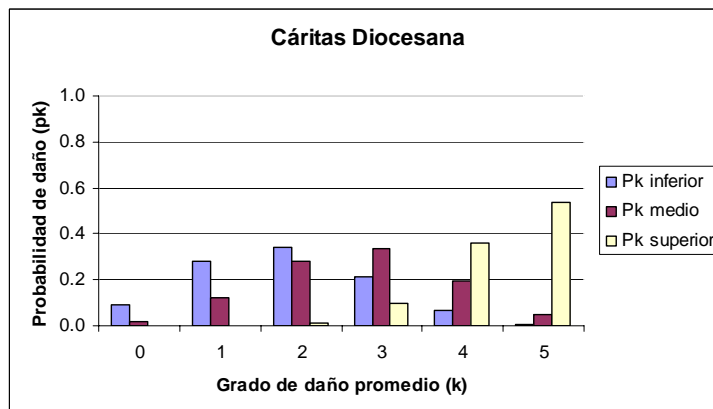
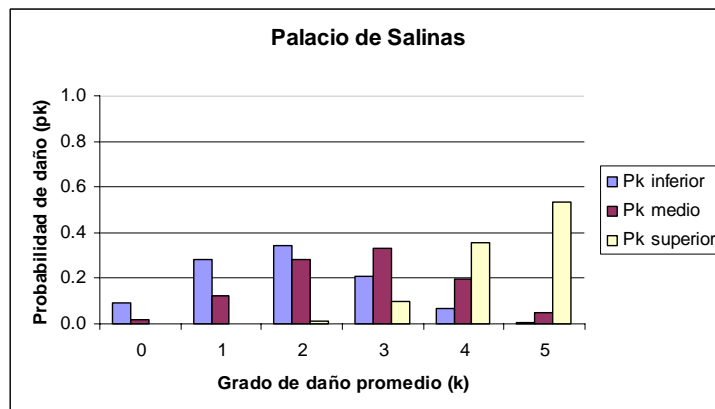
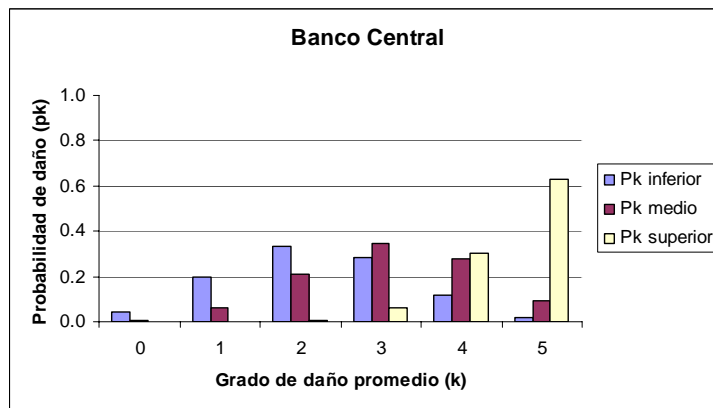
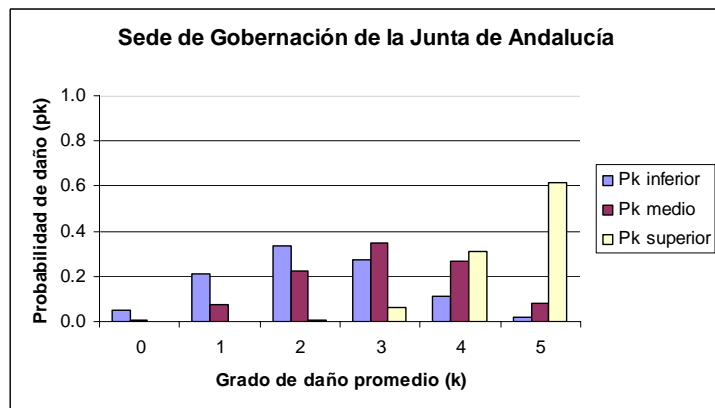
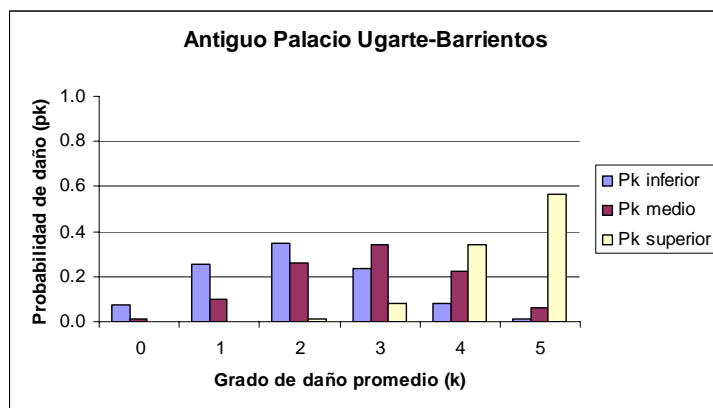
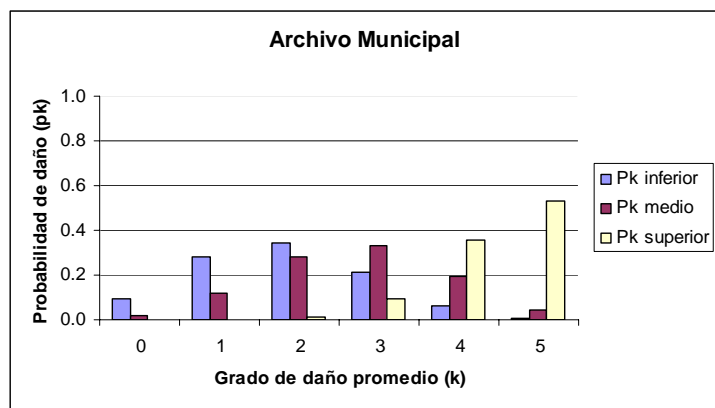


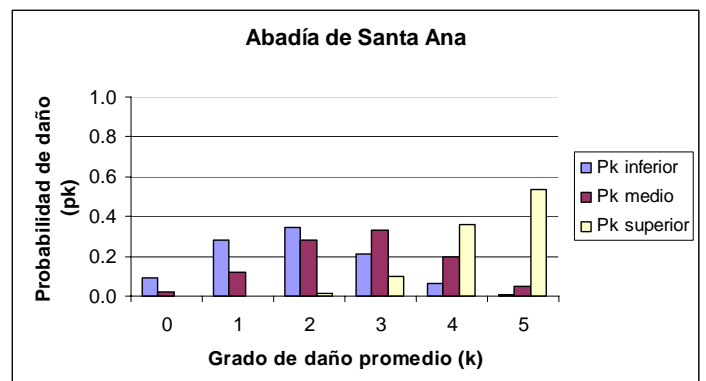
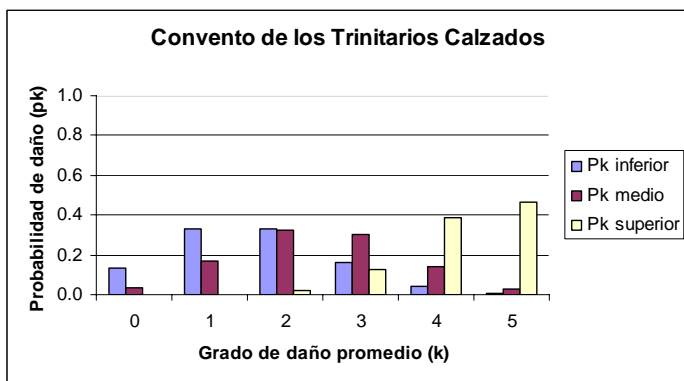
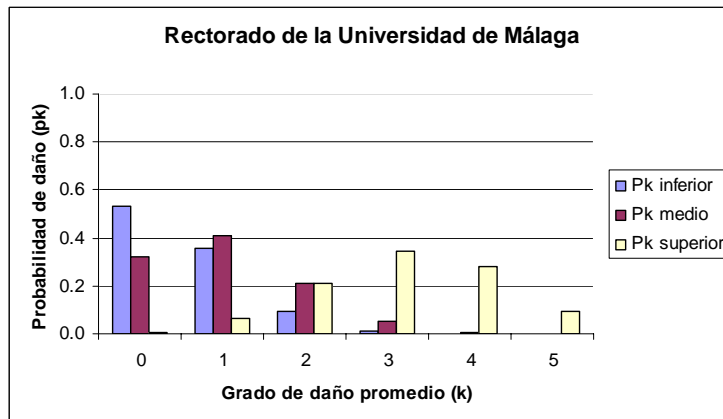
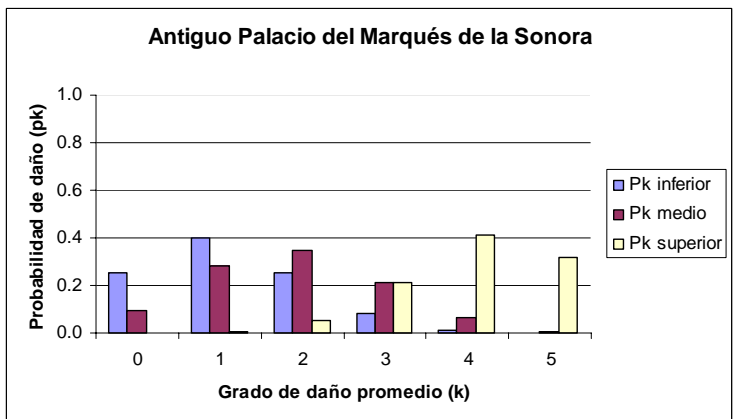
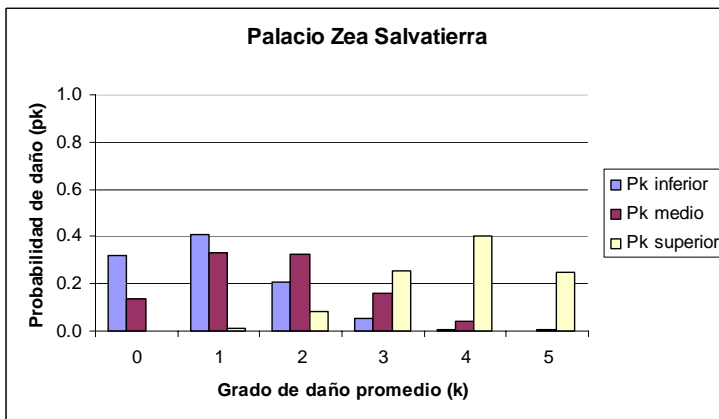
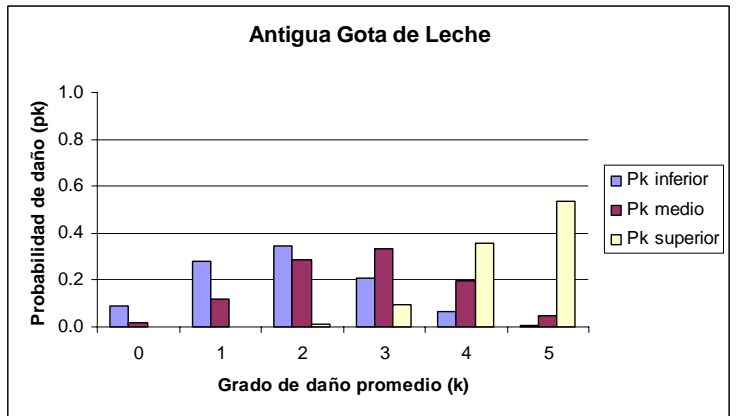
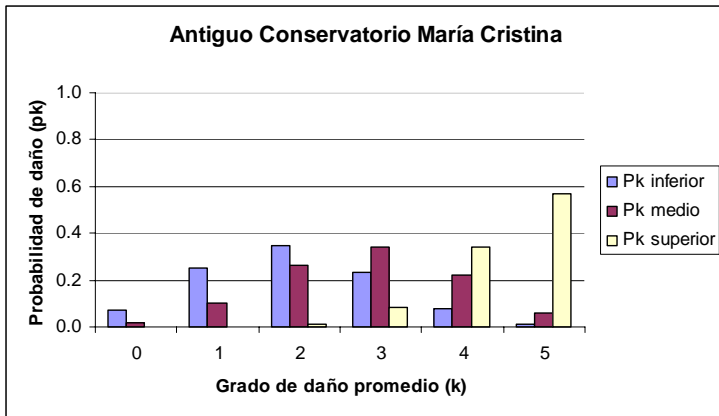


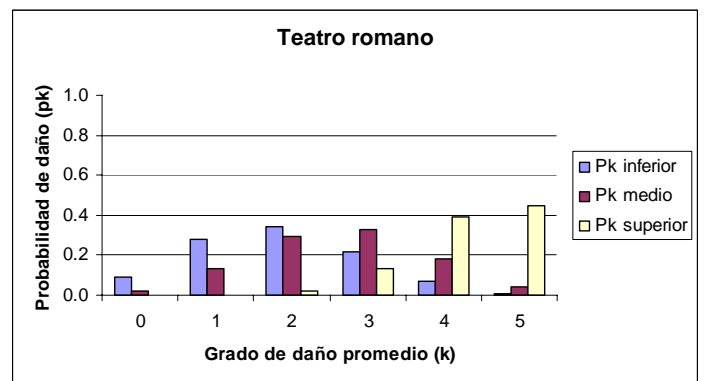
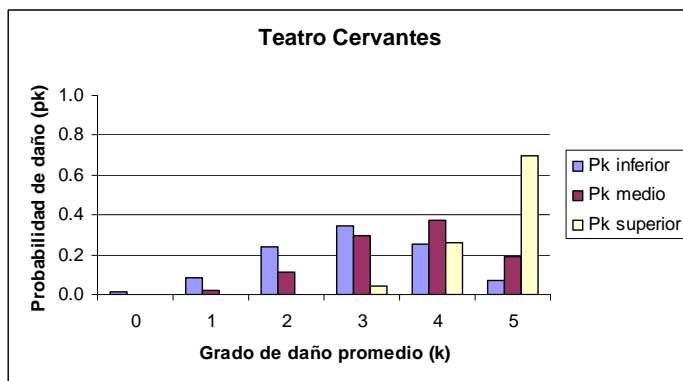
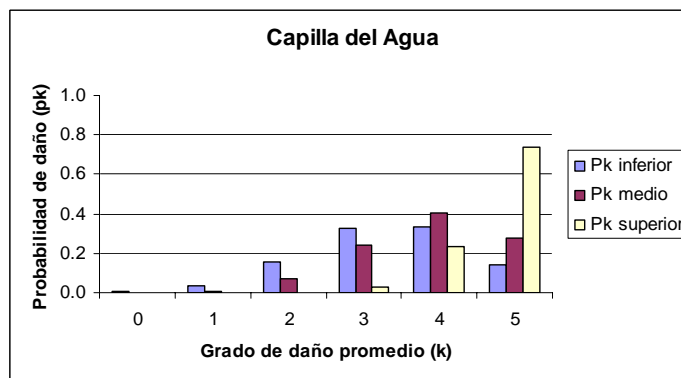
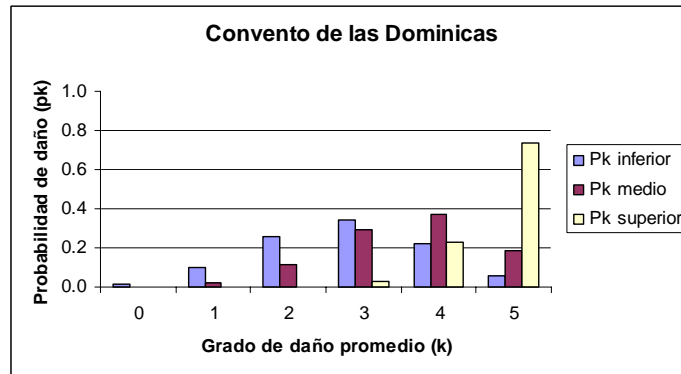
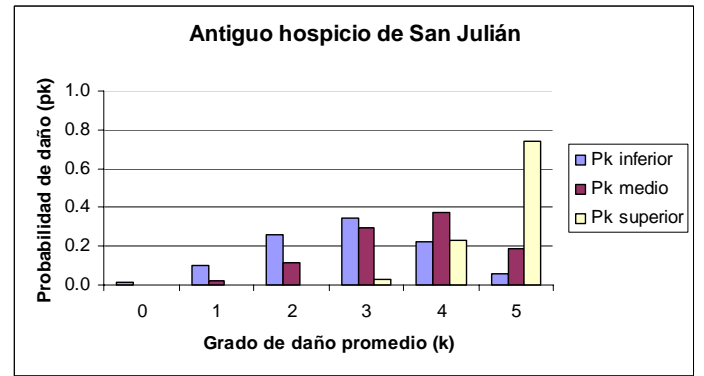
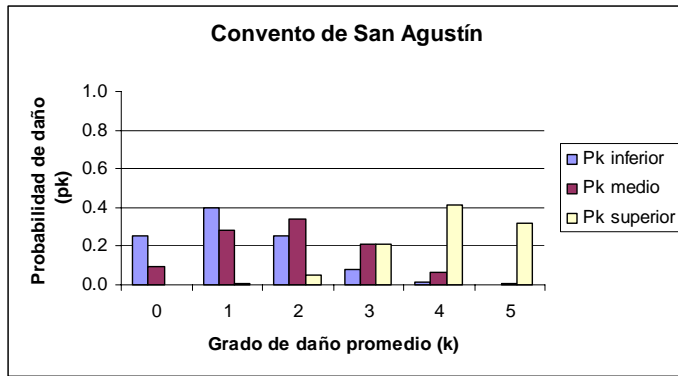


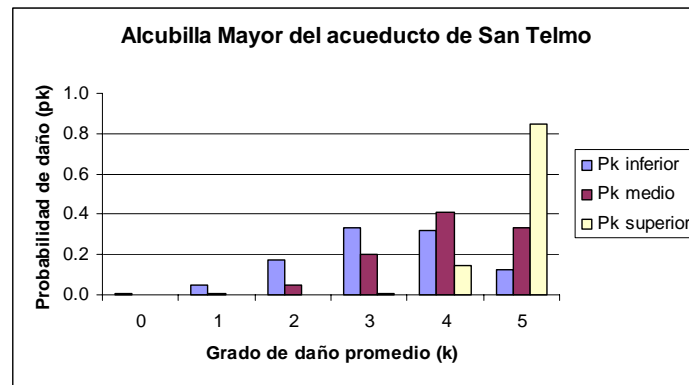














## **Anexo XII. Escenario probabilista: NCSE-02**

### **Grados de daño**



Monumento	Tipología	$\mu_d$ inferior	$\mu_d$ medio	$\mu_d$ superior
Iglesia de Nuestra Señora del Carmen	iglesia	3.63	4.07	4.77
Iglesia del convento de Santo Domingo	iglesia	3.46	3.94	4.73
Parroquia de San Juan Bautista	iglesia	3.63	4.07	4.77
Iglesia de San Pedro en los Percheles	iglesia	3.37	3.86	4.70
Iglesia de la Concepción	iglesia	3.46	3.94	4.73
Iglesia de la Divina Pastora y Santa Teresa de Jesús	iglesia	3.59	4.04	4.76
Parroquia de los Santos Mártires	iglesia	3.63	4.07	4.77
Iglesia de San Pablo	iglesia	3.08	3.63	4.63
Castillo de Gibralfaro	castillo	0.65	1.02	2.90
Alcazaba	castillo	0.65	1.02	2.90
Convento de San Onofre de Trinitarios Calzados	monasterio	1.21	1.90	3.98
Iglesia del Santo Cristo de la Salud (San Telmo)	iglesia	3.90	4.27	4.82
Iglesia del convento de Nuestra Señora de la Victoria	iglesia	2.68	3.28	4.49
Abadía de Santa Ana	monasterio	1.42	2.16	4.14
Parroquia de Sagrario	iglesia	1.96	2.57	4.16
Casa Episcopal	palacio	1.53	2.30	4.22
Colegio Seminario	palacio	1.59	2.36	4.25
Convento de San Agustín	monasterio	0.86	1.42	3.58
Santa iglesia de la Catedral / Basílica de la Encarnación	iglesia	2.36	2.98	4.37
Parroquia de Santiago	iglesia	2.16	2.78	4.27
Antiguo hospicio de San Julián	monasterio	2.30	3.10	4.56
Teatro Cervantes	teatro	2.50	3.19	4.51
Casa de los Condes de las Navas	palacio	1.90	2.70	4.41
Instituto de Turismo Andaluz	palacio	0.78	1.31	3.47
Fundación Martí Torres	palacio	1.84	2.64	4.38
Casa del Consulado	palacio	1.31	2.03	4.06
Hogar de Jesús Abandonado	palacio	1.65	2.43	4.29
Facultad de Filosofía y Letras	palacio	0.56	0.98	3.04
Museo Picasso	palacio	0.44	0.78	2.70
Museo de Artes Populares	palacio	1.02	1.65	3.79
Antigua casa y taller del escultor Pedro de Mena	palacio	0.49	0.86	2.84
Palacio de los Condes de Villalcázar	palacio	1.65	2.43	4.29
Gobierno Civil. Antigua Aduana	palacio	0.59	1.02	3.10
Banco de España	palacio	0.40	0.71	2.57
Ayuntamiento	palacio	0.71	1.21	3.35
Mercado Central de Atarazanas	palacio	1.11	1.77	3.89
Capilla del Agua	ermita	2.98	3.55	4.60
Iglesia y convento de las Dominicas (vulgo Catalinas)	monasterio	2.30	3.10	4.56
Archivo Municipal	palacio	1.42	2.16	4.14
Antiguo Palacio Ugarte-Barrientos	palacio	1.53	2.30	4.22
Sede de Gobernación de la Junta de Andalucía	palacio	1.71	2.50	4.32
Banco Central	palacio	1.77	2.57	4.35
Palacio de Salinas	palacio	1.42	2.16	4.14
Cáritas Diocesana	palacio	1.42	2.16	4.14
Antiguo Montepío de Viñeros	palacio	1.90	2.70	4.41
Antiguo palacio de Valdeflores	palacio	1.21	1.90	3.98
Antiguo Conservatorio María Cristina	palacio	1.53	2.30	4.22
Alcubilla Mayor del acueducto de San Telmo	torre	2.77	3.63	4.75
Antigua Gota de Leche	palacio	1.42	2.16	4.14
Palacio Zea Salvatierra	palacio	0.71	1.21	3.35
Antiguo Palacio del Marqués de la Sonora	palacio	0.86	1.42	3.58
Teatro romano	teatro	1.50	2.15	3.99
Iglesia de San Lázaro	iglesia	3.71	4.13	4.78
Rectorado de la Universidad de Málaga	palacio	0.40	0.71	2.57

## **Tablas de probabilidades de daño**

## Probabilidades de daño a partir del índice de vulnerabilidad inferior

Monumento \ Grado de daño (k)	0	1	2	3	4	5
Iglesia de Nuestra Señora del Carmen	0.002	0.020	0.108	0.287	0.381	0.202
Iglesia del convento de Santo Domingo	0.003	0.031	0.140	0.315	0.353	0.158
Parroquia de San Juan Bautista	0.002	0.020	0.108	0.287	0.381	0.202
Iglesia de San Pedro en los Percheles	0.004	0.038	0.157	0.325	0.336	0.139
Iglesia de la Concepción	0.003	0.031	0.140	0.314	0.353	0.159
Iglesia de la Divina Pastora y Santa Teresa de Jesús	0.002	0.023	0.116	0.294	0.375	0.191
Parroquia de los Santos Mártires	0.002	0.020	0.108	0.287	0.381	0.202
Iglesia de San Pablo	0.008	0.067	0.215	0.345	0.276	0.089
Castillo de Gibralfaro	0.498	0.372	0.111	0.017	0.001	0.000
Alcazaba	0.498	0.372	0.111	0.017	0.001	0.000
Convento de San Onofre de Trinitarios Calzados	0.250	0.399	0.255	0.081	0.013	0.001
Iglesia del Santo Cristo de la Salud (San Telmo)	0.001	0.009	0.065	0.230	0.407	0.289
Iglesia del convento de Ntra.Sra. de la Victoria	0.022	0.124	0.287	0.332	0.191	0.044
Abadía de Santa Ana	0.188	0.373	0.296	0.117	0.023	0.002
Parroquia de Sagrario	0.083	0.268	0.345	0.223	0.072	0.009
Casa Episcopal	0.161	0.355	0.313	0.138	0.030	0.003
Colegio Seminario	0.148	0.344	0.321	0.150	0.035	0.003
Convento de San Agustín	0.389	0.404	0.168	0.035	0.004	0.000
Catedral	0.041	0.183	0.328	0.293	0.131	0.023
Parroquia de Santiago	0.059	0.225	0.342	0.260	0.099	0.015
Antiguo hospicio de San Julián	0.046	0.196	0.333	0.284	0.121	0.021
Teatro Cervantes	0.031	0.156	0.313	0.313	0.156	0.031
Casa de los Condes de las Navas	0.092	0.281	0.344	0.211	0.065	0.008
Instituto de Turismo Andaluz	0.428	0.396	0.146	0.027	0.002	0.000
Fundación Martí Torres	0.101	0.294	0.342	0.199	0.058	0.007
Casa del Consulado	0.219	0.389	0.276	0.098	0.017	0.001
Hogar de Jesús Abandonado	0.135	0.332	0.328	0.161	0.040	0.004
Facultad de Filosofía y Letras	0.552	0.348	0.088	0.011	0.001	0.000
Museo Picasso	0.631	0.304	0.059	0.006	0.000	0.000
Museo de Artes Populares	0.320	0.409	0.210	0.054	0.007	0.000
Antigua casa y taller del escultor Pedro de Mena	0.597	0.324	0.070	0.008	0.000	0.000
Palacio de los Condes de Villalcázar	0.135	0.332	0.328	0.161	0.040	0.004
Gobierno Civil. Antigua Aduana	0.534	0.357	0.096	0.013	0.001	0.000
Banco de España	0.659	0.287	0.050	0.004	0.000	0.000
Ayuntamiento	0.465	0.385	0.127	0.021	0.002	0.000
Mercado Central de Atarazanas	0.285	0.407	0.232	0.066	0.009	0.001
Capilla del Agua	0.011	0.079	0.234	0.346	0.255	0.075
Iglesia y convento de las Dominicas	0.046	0.196	0.333	0.284	0.121	0.021
Archivo Municipal	0.188	0.373	0.296	0.117	0.023	0.002
Antiguo Palacio Ugarte-Barrientos	0.161	0.355	0.313	0.138	0.030	0.003
Sede de Gobernación de la Junta de Andalucía	0.123	0.321	0.333	0.173	0.045	0.005
Banco Central	0.113	0.308	0.338	0.185	0.051	0.006
Palacio de Salinas	0.188	0.373	0.296	0.117	0.023	0.002
Cáritas Diocesana	0.188	0.373	0.296	0.117	0.023	0.002
Antiguo Montepío de Viñeros	0.092	0.281	0.344	0.211	0.065	0.008
Antiguo palacio de Valdeflores	0.250	0.399	0.255	0.081	0.013	0.001
Antiguo Conservatorio María Cristina	0.161	0.355	0.313	0.138	0.030	0.003
Alcubilla Mayor del acueducto de San Telmo	0.018	0.110	0.272	0.338	0.210	0.052
Antigua Gota de Leche	0.188	0.373	0.296	0.117	0.023	0.002
Palacio Zea Salvatierra	0.465	0.385	0.127	0.021	0.002	0.000
Antiguo Palacio del Marqués de la Sonora	0.389	0.404	0.168	0.035	0.004	0.000
Teatro romano	0.168	0.360	0.309	0.132	0.028	0.002
Iglesia de San Lázaro	0.001	0.016	0.095	0.272	0.391	0.225
Rectorado de la Universidad de Málaga	0.659	0.287	0.050	0.004	0.000	0.000

## Probabilidades de daño a partir del índice de vulnerabilidad medio

Monumento \ Grado de daño (k)	0	1	2	3	4	5
Iglesia de Nuestra Señora del Carmen	0.000	0.005	0.043	0.187	0.408	0.357
Iglesia del convento de Santo Domingo	0.000	0.008	0.059	0.220	0.409	0.304
Parroquia de San Juan Bautista	0.000	0.005	0.043	0.187	0.408	0.357
Iglesia de San Pedro en los Percheles	0.001	0.010	0.071	0.239	0.405	0.274
Iglesia de la Concepción	0.000	0.008	0.059	0.220	0.409	0.304
Iglesia de la Divina Pastora y Santa Teresa de Jesús	0.000	0.005	0.046	0.194	0.409	0.344
Parroquia de los Santos Mártires	0.000	0.005	0.043	0.187	0.408	0.357
Iglesia de San Pablo	0.002	0.020	0.108	0.287	0.381	0.202
Castillo de Gibralfaro	0.320	0.409	0.210	0.054	0.007	0.000
Alcazaba	0.320	0.409	0.210	0.054	0.007	0.000
Convento de San Onofre de Trinitarios Calzados	0.092	0.281	0.344	0.211	0.065	0.008
Iglesia del Santo Cristo de la Salud (San Telmo)	0.000	0.002	0.023	0.133	0.388	0.454
Iglesia del convento de Ntra.Sra. de la Victoria	0.005	0.046	0.175	0.334	0.319	0.121
Abadía de Santa Ana	0.059	0.225	0.342	0.260	0.099	0.015
Parroquia de Sagrario	0.027	0.143	0.303	0.321	0.170	0.036
Casa Episcopal	0.046	0.196	0.333	0.284	0.121	0.021
Colegio Seminario	0.041	0.183	0.328	0.293	0.131	0.023
Convento de San Agustín	0.188	0.373	0.296	0.117	0.023	0.002
Catedral	0.011	0.079	0.234	0.346	0.255	0.075
Parroquia de Santiago	0.017	0.108	0.271	0.339	0.212	0.053
Antiguo hospicio de San Julián	0.008	0.065	0.211	0.344	0.281	0.092
Teatro Cervantes	0.006	0.055	0.193	0.340	0.300	0.106
Casa de los Condes de las Navas	0.021	0.121	0.284	0.333	0.196	0.046
Instituto de Turismo Andaluz	0.219	0.389	0.276	0.098	0.017	0.001
Fundación Martí Torres	0.023	0.131	0.293	0.328	0.183	0.041
Casa del Consulado	0.074	0.253	0.345	0.236	0.081	0.011
Hogar de Jesús Abandonado	0.036	0.170	0.321	0.303	0.143	0.027
Facultad de Filosofía y Letras	0.336	0.409	0.200	0.049	0.006	0.000
Museo Picasso	0.428	0.396	0.146	0.027	0.002	0.000
Museo de Artes Populares	0.135	0.332	0.328	0.161	0.040	0.004
Antigua casa y taller del escultor Pedro de Mena	0.389	0.404	0.168	0.035	0.004	0.000
Palacio de los Condes de Villalcázar	0.036	0.170	0.321	0.303	0.143	0.027
Gobierno Civil. Antigua Aduana	0.320	0.409	0.210	0.054	0.007	0.000
Banco de España	0.465	0.385	0.127	0.021	0.002	0.000
Ayuntamiento	0.250	0.399	0.255	0.081	0.013	0.001
Mercado Central de Atarazanas	0.113	0.308	0.338	0.185	0.051	0.006
Capilla del Agua	0.002	0.025	0.123	0.301	0.368	0.180
Iglesia y convento de las Dominicas	0.008	0.065	0.211	0.344	0.281	0.092
Archivo Municipal	0.059	0.225	0.342	0.260	0.099	0.015
Antiguo Palacio Ugarte-Barrientos	0.046	0.196	0.333	0.284	0.121	0.021
Sede de Gobernación de la Junta de Andalucía	0.031	0.156	0.313	0.313	0.156	0.031
Banco Central	0.027	0.143	0.303	0.321	0.170	0.036
Palacio de Salinas	0.059	0.225	0.342	0.260	0.099	0.015
Cáritas Diocesana	0.059	0.225	0.342	0.260	0.099	0.015
Antiguo Montepío de Viñeros	0.021	0.121	0.284	0.333	0.196	0.046
Antiguo palacio de Valdeflores	0.092	0.281	0.344	0.211	0.065	0.008
Antiguo Conservatorio María Cristina	0.046	0.196	0.333	0.284	0.121	0.021
Alcubilla Mayor del acueducto de San Telmo	0.002	0.020	0.108	0.287	0.381	0.202
Antigua Gota de Leche	0.059	0.225	0.342	0.260	0.099	0.015
Palacio Zea Salvatierra	0.250	0.399	0.255	0.081	0.013	0.001
Antiguo Palacio del Marqués de la Sonora	0.188	0.373	0.296	0.117	0.023	0.002
Teatro romano	0.060	0.227	0.342	0.258	0.097	0.015
Iglesia de San Lázaro	0.000	0.004	0.036	0.171	0.405	0.385
Rectorado de la Universidad de Málaga	0.465	0.385	0.127	0.021	0.002	0.000

## Probabilidades de daño a partir del índice de vulnerabilidad superior

Monumento \ Grado de daño (k)	0	1	2	3	4	5
Iglesia de Nuestra Señora del Carmen	0.000	0.000	0.001	0.018	0.191	0.790
Iglesia del convento de Santo Domingo	0.000	0.000	0.001	0.025	0.216	0.758
Parroquia de San Juan Bautista	0.000	0.000	0.001	0.018	0.191	0.790
Iglesia de San Pedro en los Percheles	0.000	0.000	0.002	0.030	0.234	0.734
Iglesia de la Concepción	0.000	0.000	0.001	0.025	0.216	0.758
Iglesia de la Divina Pastora y Santa Teresa de Jesús	0.000	0.000	0.001	0.020	0.197	0.782
Parroquia de los Santos Mártires	0.000	0.000	0.001	0.018	0.191	0.790
Iglesia de San Pablo	0.000	0.000	0.003	0.043	0.272	0.681
Castillo de Gibralfaro	0.013	0.090	0.249	0.344	0.238	0.066
Alcazaba	0.013	0.090	0.249	0.344	0.238	0.066
Convento de San Onofre de Trinitarios Calzados	0.000	0.007	0.054	0.210	0.409	0.320
Iglesia del Santo Cristo de la Salud (San Telmo)	0.000	0.000	0.000	0.012	0.155	0.833
Iglesia del convento de Ntra.Sra. de la Victoria	0.000	0.000	0.009	0.075	0.332	0.584
Abadía de Santa Ana	0.000	0.004	0.035	0.168	0.404	0.389
Parroquia de Sagrario	0.000	0.003	0.033	0.163	0.403	0.399
Casa Episcopal	0.000	0.002	0.027	0.146	0.396	0.428
Colegio Seminario	0.000	0.002	0.024	0.138	0.392	0.444
Convento de San Agustín	0.002	0.023	0.117	0.296	0.373	0.188
Catedral	0.000	0.001	0.015	0.106	0.368	0.510
Parroquia de Santiago	0.000	0.002	0.023	0.133	0.388	0.454
Antiguo hospicio de San Julián	0.000	0.000	0.006	0.059	0.304	0.631
Teatro Cervantes	0.000	0.000	0.008	0.070	0.324	0.597
Casa de los Condes de las Navas	0.000	0.001	0.013	0.096	0.357	0.534
Instituto de Turismo Andaluz	0.003	0.030	0.138	0.313	0.355	0.161
Fundación Martí Torres	0.000	0.001	0.015	0.103	0.365	0.516
Casa del Consulado	0.000	0.005	0.044	0.189	0.409	0.353
Hogar de Jesús Abandonado	0.000	0.002	0.021	0.127	0.385	0.465
Facultad de Filosofía y Letras	0.009	0.072	0.223	0.345	0.268	0.083
Museo Picasso	0.021	0.121	0.284	0.333	0.196	0.046
Museo de Artes Populares	0.001	0.013	0.081	0.255	0.399	0.250
Antigua casa y taller del escultor Pedro de Mena	0.015	0.099	0.260	0.342	0.225	0.059
Palacio de los Condes de Villalcázar	0.000	0.002	0.021	0.127	0.385	0.465
Gobierno Civil. Antigua Aduana	0.008	0.065	0.211	0.344	0.281	0.092
Banco de España	0.027	0.143	0.303	0.321	0.170	0.036
Ayuntamiento	0.004	0.040	0.161	0.328	0.332	0.135
Mercado Central de Atarazanas	0.001	0.009	0.066	0.232	0.407	0.285
Capilla del Agua	0.000	0.000	0.004	0.050	0.287	0.659
Iglesia y convento de las Dominicas	0.000	0.000	0.006	0.059	0.304	0.631
Archivo Municipal	0.000	0.004	0.035	0.168	0.404	0.389
Antiguo Palacio Ugarte-Barrientos	0.000	0.002	0.027	0.146	0.396	0.428
Sede de Gobernación de la Junta de Andalucía	0.000	0.001	0.019	0.119	0.379	0.481
Banco Central	0.000	0.001	0.017	0.111	0.372	0.498
Palacio de Salinas	0.000	0.004	0.035	0.168	0.404	0.389
Cáritas Diocesana	0.000	0.004	0.035	0.168	0.404	0.389
Antiguo Montepío de Viñeros	0.000	0.001	0.013	0.096	0.357	0.534
Antiguo palacio de Valdeflores	0.000	0.007	0.054	0.210	0.409	0.320
Antiguo Conservatorio María Cristina	0.000	0.002	0.027	0.146	0.396	0.428
Alcubilla Mayor del acueducto de San Telmo	0.000	0.000	0.001	0.021	0.204	0.774
Antigua Gota de Leche	0.000	0.004	0.035	0.168	0.404	0.389
Palacio Zea Salvatierra	0.004	0.040	0.161	0.328	0.332	0.135
Antiguo Palacio del Marqués de la Sonora	0.002	0.023	0.117	0.296	0.373	0.188
Teatro romano	0.000	0.007	0.052	0.207	0.410	0.324
Iglesia de San Lázaro	0.000	0.000	0.001	0.017	0.184	0.799
Rectorado de la Universidad de Málaga	0.027	0.143	0.303	0.321	0.170	0.036

## **Histogramas de probabilidades de daño**

Las figuras aparecen ordenadas según la referencia del monumento, y clasificadas según su tipología: iglesias, castillos, palacios, monasterios, ermitas, teatros y torres.

